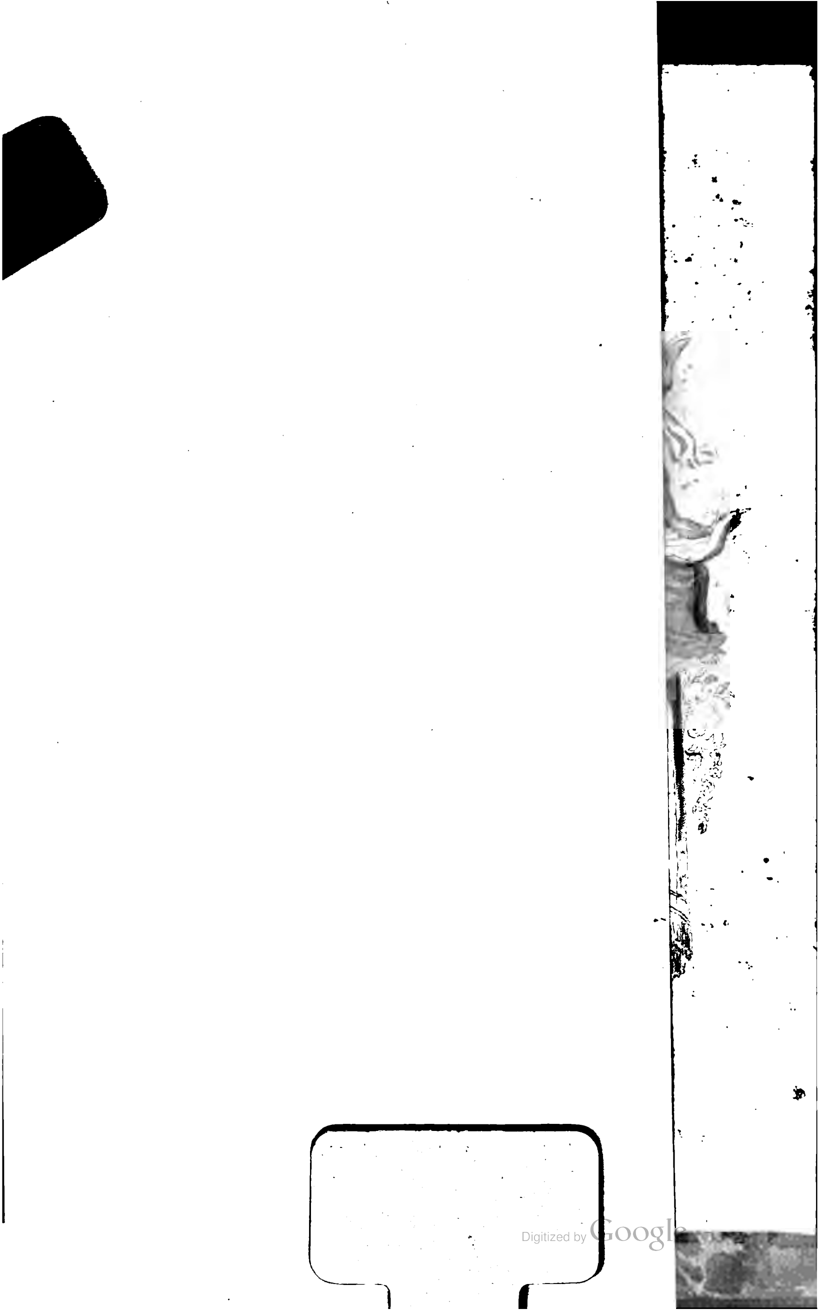




BIBLIOTHÈQUE

DES MERVEILLES

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION
DE M. ÉDOUARD CHARTON

(Thomas) editor.

L'ÉLECTRICITÉ

COMME FORCE MOTRICE

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

PUBLIÉS DANS LA BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES

Le Téléphone. 1 volume illustré de 141 figures par B. Bonnafoux.

Le Microphone, le Radiophone et le Phonographe. 1 volume illustré de 119 figures, par Bonnafoux et Chauvet. (Ce volume est la suite du précédent.)

La Lumière électrique. 1 volume illustré de 80 figures par Bonnafoux, Chauvet, Jahandier.

7589. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.

BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES

L'ÉLECTRICITÉ

COMME

FORCE MOTRICE

PAR

Théodore (Achille Louis)

LE COMTE TH. DU MONCEL

Membre de l'Institut

ET M. FRANK GERALDY

Ingénieur des ponts et chaussées

OUVRAGE

ILLUSTRÉ DE 112 FIGURES DESSINÉES SUR BOIS

PAR MM. ALIX, LÉGER ET POYET

PARIS

LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie

79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1883

L'ÉLECTRICITÉ

COMME FORCE MOTRICE

INTRODUCTION

ET NOTIONS PRÉLIMINAIRES

La force motrice est la base de la plupart des grandes industries, et dès les premiers âges du monde on s'est occupé d'en rechercher des sources économiques et fécondes. Longtemps cette force a été demandée à l'énergie musculaire de l'homme et des animaux, mais on a compris qu'on pouvait mieux utiliser cette dernière, et on a recherché si les éléments de la nature ne pouvaient la fournir dans de bien meilleures conditions d'économie et de puissance. Les effets de la pesanteur, les mouvements des cours d'eau, les agitations de l'air furent d'abord mis à contribution, et on combina des machines capables de transformer ces actions naturelles en un mouvement circulaire susceptible d'être transformé à son tour de mille manières différentes pour s'appliquer aux divers besoins de l'industrie. Mais on n'a pas toujours à sa disposition un cours d'eau, l'action du vent est trop capri-

cieuse et trop irrégulière, et les effets de la pesanteur ne peuvent produire une action utilisable qu'autant qu'ils peuvent se renouveler indéfiniment, ce qu'on ne peut obtenir qu'avec un cours d'eau présentant une certaine hauteur de chute. Les progrès de l'industrie humaine exigeaient d'ailleurs qu'on pût créer des moteurs susceptibles d'être placés là où le besoin s'en faisait sentir, dont la puissance pût être développée dans telle proportion et à tel moment qu'il pouvait convenir, enfin qui fussent asservis à la volonté humaine. Ce problème, dès les temps anciens, avait donné carrière à l'imagination des inventeurs, et avait provoqué même la recherche du *mouvement perpétuel* après lequel courent encore aujourd'hui quelques illuminés; mais quand on put reconnaître que pour obtenir un pareil résultat il faudrait que l'une des grandes lois de la nature (*l'équilibre*) n'existât pas, les esprits sains durent demander aux actions physiques la solution du problème, et ce fut Denis Papin qui ouvrit la voie en découvrant la force expansive de la vapeur et en construisant lui-même un moteur fondé sur ce principe. On connaît l'histoire de cette magnifique découverte et les ressources immenses que les machines à vapeur ont mises entre nos mains. Vouloir les énumérer, ce serait faire l'histoire de toute l'industrie moderne. Pourtant cette source de force motrice n'est pas restée la seule à être employée, et aujourd'hui nous voyons que les machines fondées sur la dilatation des gaz jouent un grand rôle dans les petites industries, et tous les jours elles tendent à se multiplier, preuve certaine que la division de la force motrice est devenue la question à l'ordre du jour. A ce point de vue cependant, le problème a pu être résolu dans ces derniers temps d'une manière satisfaisante par un moyen nouveau, par l'intermédiaire d'un agent physique auquel on n'aurait guère pensé pour cette fonction il y a un demi-siècle à peine, et qui dans ces derniers temps est venu nous révéler des effets que

l'on oserait à peine concevoir. Quand on pense que l'on peut aujourd'hui transporter à toute distance une force de plusieurs chevaux par un fil que l'on pourrait faire passer par le trou d'une serrure, sans qu'on découvre en lui aucun mouvement, aucun changement dans son aspect, l'imagination elle-même est stupéfiée et l'on se demande si ce n'est pas de la magie! Tel est cependant ce que peuvent produire aujourd'hui les électromoteurs; grâce à eux, des forces naturelles inutilisables peuvent fournir à distance un travail qui n'aurait pu être exécuté sur place; les emplacements ne signifient plus rien et vous pouvez demander une concession de force comme vous demanderiez une concession d'eau ou de gaz; le même fluide qui vous fournit la force peut vous donner la lumière. Que de chemin fait depuis quelques années dans les sciences!... Alors qu'on ne développait à grand'-peine, par les moyens électriques, que quelques kilogrammètres de force, aujourd'hui on fait travailler des charrues, des pompes à jets énormes, des grues, des scieries mécaniques, des machines à raboter, à percer, à forer, des tramways même!!!! La dernière Exposition nous a pourtant montré toutes ces merveilles.

Les premiers essais qui ont été tentés pour obtenir la force motrice par l'électricité n'ont pas été heureux. Beaucoup d'inventeurs y ont dépensé des sommes d'argent considérables pour n'arriver qu'à des résultats insignifiants, et ce n'est que quand on a essayé la réversibilité des machines d'induction à courant continu, qu'on a pu croire à une solution avantageuse du problème. On n'avait d'ailleurs pas jusque-là des forces électriques assez énergiques pour obtenir un travail appréciable. Mais quand on put s'assurer qu'avec deux machines dynamo-électriques attelées l'une à l'autre, on pouvait faire produire à l'une près de la moitié de la force motrice dépensée sur l'autre pour produire de l'électricité, on put croire que non seulement l'on se trouverait de cette ma-

nière en possession d'un système de transmission de la force à distance, qui pourrait être souvent très utilement utilisé dans ces conditions mêmes, mais encore que les machines électromotrices elles-mêmes étaient susceptibles de fournir une force bien supérieure à celle qu'on leur supposait, en leur appliquant des courants convenablement énergiques. Jusque-là, en effet, on n'avait jamais pu produire, de cette manière, une force atteignant un cheval-vapeur, et les moteurs les plus perfectionnés ne donnaient que 1 à 2 kilogrammètres de force, ce qui était dérisoire eu égard à la dépense qu'ils nécessitaient. On était d'ailleurs dans une fausse voie, car on cherchait à augmenter la puissance motrice par l'augmentation non raisonnée des dimensions des organes électro-magnétiques. Depuis que la question est entrée dans une nouvelle phase, on l'a étudiée d'une manière plus sérieuse, et on a pu créer des moteurs de petit volume, qui dès maintenant peuvent fournir un travail efficace et utile dans l'industrie. Nous réserverons un chapitre à ces petits moteurs dont les types les plus connus sont ceux de MM. Deprez, Trouvé, Griscom, etc. Mais nous devons dire dès maintenant que les forces importantes ne peuvent être fournies que par les machines dynamo-électriques à courants continus, telles que celles de Gramme et de Siemens.

Les causes qui ont fait échouer les premières tentatives, tenaient surtout à ce qu'on ne cherchait à utiliser que la force attractive directe qui est, comme on le sait, extrêmement limitée et presque la même pour de forts organes électro-magnétiques comme pour de petits, à ce que la disposition des commutateurs donnait toute facilité aux courants induits de fermeture, créés dans les organes électro-magnétiques, de se développer en réagissant en sens inverse du courant transmis, à ce que les aimantations et les désaimantations s'effectuant lentement dans des électro-aimants un peu grôs, on ne pouvait utiliser qu'une très faible partie de leur magnétisme qui

devenait même nuisible au moment où l'on n'en avait pas besoin, à ce que les actions directes, exercées entre les armatures et les électro-aimants pouvant faire fléchir les supports, exigeaient des écarts trop grands entre les pièces magnétiques, et faisaient perdre le meilleur de leur puissance de travail, enfin à ce que les commutateurs se trouvaient détériorés par les étincelles électriques et surtout celles des extra-courants. Nous aurons occasion à l'instant d'étudier les moyens qu'on avait imaginés pour conjurer ces différents inconvénients, mais ils étaient évidemment insuffisants, puisqu'on n'en a jamais obtenu de bons résultats, et ce n'est que quand on est entré dans une voie nouvelle que ces obstacles se sont trouvés assez amoindris pour ne plus empêcher la marche régulière des appareils. Ces considérations nous ont indiqué l'ordre que nous devions suivre dans l'ouvrage que nous publions aujourd'hui et que nous diviserons en deux parties : l'une traitant de la première phase dans laquelle sont entrés les moteurs électriques depuis leur origine jusqu'au moment où l'on a pensé à recourir au principe de la réversibilité des machines d'induction, l'autre traitant de cette seconde phase de la question, de tout ce qui se rapporte aux recherches et applications qu'on a faites du principe de la réversibilité aux moteurs industriels, au transport de la force et à sa distribution à domicile. Toutefois il nous a paru nécessaire, afin de mettre le lecteur à même de bien saisir les parties techniques de la question, de donner quelques notions préliminaires sur les organes électriques employés dans ces sortes de moteurs, et ces notions formeront une sorte d'introduction à ce nouveau volume.

PRINCIPES SUR LESQUELS EST FONDÉE LA CONSTRUCTION DES ÉLECTROMOTEURS.

Tous les effets du fluide électrique susceptibles d'imprimer à un corps une direction ou de développer une force attractive ou répulsive peuvent être combinés mécaniquement, de manière à former un moteur électrique. Ainsi, les effets des courants électriques les uns sur les autres, l'action des courants sur les aimants et réciproquement l'action des aimants sur les courants, l'action des aimants temporaires sur les corps magnétiques non aimantés, peuvent, si l'on augmente suffisamment la force électrique et la grosseur des pièces qui en subissent l'action, donner lieu à des moteurs électro-dynamiques. On conçoit en effet que possédant, par l'intermédiaire de l'électricité, une force susceptible d'être détruite à un instant donné, puisqu'il ne s'agit pour cela que d'interrompre le courant, il suffit d'un mécanisme bien simple pour traduire l'impulsion à laquelle elle donne lieu en un mouvement circulaire continu. Toutefois, de toutes ces réactions, ce sont les attractions et répulsions électro-magnétiques et celles de courants parallèles dirigés dans le même sens, lesquelles sont représentées par les attractions des solénoïdes, qui ont été jusqu'ici le plus utilisées, en dehors des effets de réversibilité des machines dynamo-électriques à courants continus dont la théorie n'est pas encore parfaitement élucidée.

Pour obtenir avec les attractions électro-magnétiques un mouvement circulaire, il suffit, comme on le comprend aisément, de faire réagir sur un axe mobile une série d'impulsions résultant de ces attractions, et de munir cet axe d'un interrupteur de courant qui, avant chaque action électro-magnétique, ferme le circuit et l'ouvre après l'effet produit. Or, ce problème peut être résolu *directe-*

ment en adaptant à l'axe une série d'armatures disposées comme les augets d'une roue à aubes autour d'une circonférence non magnétique et se mouvant autour d'un pareil nombre d'électro-aimants fixés tout autour de cette circonférence, ou, *indirectement*, en adaptant à cet axe une manivelle et une bielle susceptibles de transformer en mouvement circulaire le mouvement de va-et-vient créé par l'attraction momentanée d'une ou de plusieurs armatures sur les pôles des électro-aimants fixés au-devant d'elles. On peut encore combiner les effets de manière que les actions échangées entre les armatures et les électro-aimants donnent lieu à deux systèmes mobiles combinés de manière à réagir simultanément sur le même axe, et comme cette triple disposition peut s'appliquer à toutes les réactions électriques ou électro-magnétiques dont nous avons parlé, on voit déjà qu'on peut créer des électromoteurs de types bien différents qui peuvent être répartis en plusieurs classes; mais avant d'en faire la description, il nous semble indispensable d'entrer dans quelques détails sur les meilleures conditions d'établissement des organes qui entrent dans leur construction, et tout d'abord nous parlerons des électro-aimants et des solénoïdes qui sont ceux de ces organes que l'on peut considérer comme les plus importants.

DES ÉLECTRO-AIMANTS ET DES MEILLEURES CONDITIONS DE LEUR CONSTRUCTION.

Différentes sortes d'électro-aimants. — Un électro-aimant n'est, à proprement parler, qu'une barre de fer entourée d'une hélice de fil isolé, enroulé sur elle par couches successives et constituant une sorte de bobine à laquelle on a donné le nom de *bobine magnétisante*. Cette barre étant droite, comme dans la figure 1, constitue un *électro-aimant droit*, et étant recourbée, comme dans la figure 2, elle

constitue un *électro-aimant* dit en *fer à cheval*. Mais on peut obtenir ces derniers électro-aimants en les composant de deux barres de fer d'égale longueur réunies par une traverse de fer à laquelle on a donné le nom de *culasse*, comme on le voit figures 3 et 4. Les barres de fer en constituent alors les *branches*, et la bobine magnétisante, au lieu de

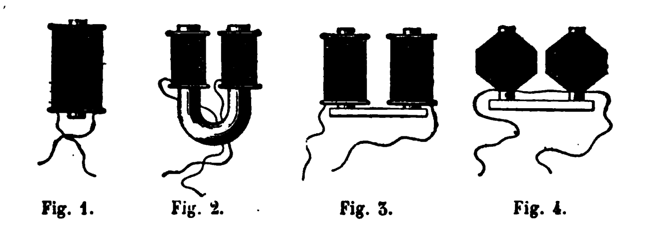


Fig. 1. Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.

recouvrir entièrement le système magnétique est divisée en deux de manière à n'envelopper que les deux branches. Le plus souvent, on donne le nom de *noyau magnétique* aux parties enveloppées par ces bobines. Quelquefois on ne recouvre qu'une seule des deux branches d'une bo-

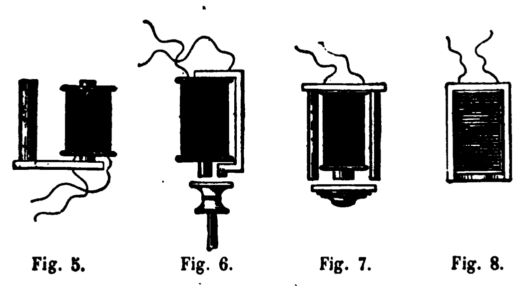


Fig. 5. Fig. 6. Fig. 7. Fig. 8.

bine, comme dans les figures 5 et 6, et l'électro-aimant est alors appelé *électro-aimant boiteux*. D'autres fois on place sur une même culasse plusieurs branches comme dans les figures 7 et 9, et l'on obtient alors des électro-aimants *à pôles multiples* ou *à pôles conséquents*. Dans ce cas, les pôles sont alternativement de noms contraires. On a aussi

donné à ces électro-aimants le nom d'électro-aimants *trifurqués*. Dans d'autres dispositions d'électro-aimants à deux pôles, on fait la culasse circulaire, et on adapte sur son pourtour un cylindre de fer qui enveloppe, de cette manière, la branche où est enroulée l'hélice magnétisante, comme dans la figure 8, et l'électro-aimant porte alors le nom d'*électro-aimant tubulaire*. L'un des deux pôles forme, dans ces conditions, un rebord circulaire au centre duquel est l'autre pôle, et entre eux deux se trouve l'hélice magnétisante. Ces électro-aimants ainsi que les autres peuvent être cylindriques ou oblongs, comme on le voit figure 10, et aujourd'hui ce sont ces derniers qui sont les plus employés; on les désigne ordinairement sous le nom d'élec-

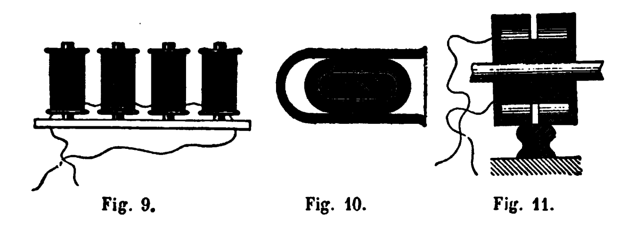


Fig. 9. Fig. 10. Fig. 11.

tro-aimants à *branches aplaties*. D'autres fois encore, comme dans la figure 11, la chemise cylindrique de l'électro-aimant précédent s'arrête à mi-hauteur de la branche enroulée, et une autre chemise cylindrique exactement semblable étant adaptée à l'autre extrémité de la branche, forme du tout une sorte de boîte cylindrique de fer soutenue au centre par le noyau de fer et renfermant à son intérieur l'hélice magnétisante. L'électro-aimant est alors appelé *circulaire*, et ses pôles sont constitués par les deux cylindres de fer fixés aux deux extrémités du noyau. Ils doivent, en conséquence, être séparés par un intervalle de quelques millimètres dans la partie du milieu du barreau. Dans ces conditions, l'électro-aimant peut rouler sur son armature en agissant tou-

jours sur celle-ci par ses deux pôles, ce qui est quelquefois très utile. Cette disposition imaginée par M. Nicklès a été souvent mise à contribution dans les applications électriques et même dans les électromoteurs, comme on le verra plus tard. Si les deux chemises cylindriques de l'électro-aimant précédent sont retirées et qu'on ne conserve que les deux rondelles de fer où elles sont rivées, il est dit *électro-aimant circulaire à rondelles de fer*, et peut souvent être appliqué dans les mêmes cas que le précédent, si l'armature est assez large pour réunir les deux rondelles. Quelquefois au lieu de deux rondelles il y en a trois, comme on le voit figure 12. On a encore employé ce système électro-magnétique avec avantage comme

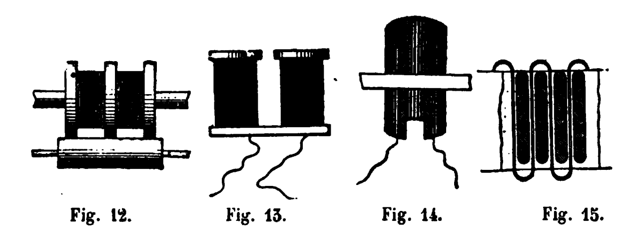


Fig. 12. Fig. 13. Fig. 14. Fig. 15.

électro-aimant en fer à cheval, mais alors les rondelles n'agissent plus que comme des semelles de fer adaptées aux pôles électro-magnétiques. La figure 13 est un électro-aimant de ce genre. Il existe encore beaucoup d'autres dispositions d'électro-aimants, telles que celles des figures 14, 15, au moyen desquelles on magnétise des plaques roulées circulairement, comme dans la figure 14, ou de manière à faire naître des pôles nord et sud en différents points de leur surface, comme dans la figure 15; mais comme ces électro-aimants sont peu employés, nous n'en parlerons parlerons pas davantage ici; nous dirons seulement que tous ces électro-aimants peuvent avoir leurs pôles prolongés ou garnis de semelles de fer, et on les appelle alors *électro-aimants à pôles épanouis*. Nous

aurons occasion de parler des avantages et des inconvénients de ces différentes formes, mais nous devons auparavant dire quelques mots de la manière dont les armatures de ces organes ont été disposées.

L'armature d'un électro-aimant peut être disposée *parallèlement* ou *angulairement* par rapport à la ligne réunissant ses pôles. Dans le premier cas, elle est soutenue par des tiges ou leviers qui la font mouvoir parallèlement à cette ligne. Dans le second, elle est articulée à l'une de ses extrémités de manière à être très près de l'un des pôles et à distance de l'autre pôle. Elle peut même alors être articulée sur le pôle le plus rapproché, et constituer un épanouissement de ce pôle. Nous verrons à l'instant que les effets électro-magnétiques sont infiniment plus

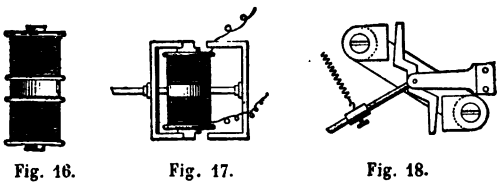


Fig. 16. Fig. 17. Fig. 18.

énergiques quand l'électro-aimant agit sur l'armature par ses deux pôles que par un seul, et c'est pourquoi on préfère généralement employer des électro-aimants en fer à cheval; mais on peut obtenir les mêmes avantages d'un électro-aimant droit en recourbant l'armature et en la disposant de manière à pouvoir se mouvoir devant les deux pôles magnétiques comme on le voit figure 17. On peut encore obtenir une attraction du même genre avec une armature droite et un électro-aimant droit muni à ses deux pôles de deux semelles de fer. Enfin, on peut obtenir une action attractive par les deux pôles d'un électro-aimant sur une armature placée entre ses pôles, en faisant en sorte que la ligne des pôles et l'axe de l'armature articulée en son point milieu forment les deux branches croisées d'un X, comme dans la figure 18.

Mais l'une des dispositions d'armatures les plus employées dans les électromoteurs est celle qui est fondée sur la force directrice des axes magnétiques qui fait qu'une armature se mouvant parallèlement et tangentiellement aux pôles d'un électro-aimant se trouve attirée jusqu'à ce que la ligne axiale de ses pôles (celle qui joint le centre des deux pôles) coïncide avec l'axe de l'armature, comme on le voit figure 19. La course attractive est alors plus grande, mais l'action est moins énergique. Cette même action peut être obtenue avec une armature droite pivotant entre les pôles d'un

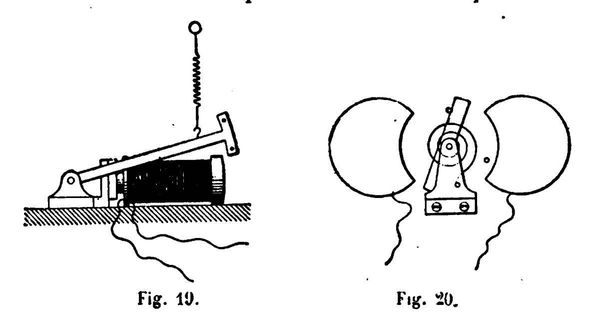


Fig. 19. Fig. 20.

électro-aimant, si ceux-ci sont épanouis et échancrés circulairement comme on le voit figure 20.

Souvent on emploie des armatures polarisées, et comme elles pourraient aisément se désaimanter si elles étaient constituées par des barreaux d'acier aimanté, comme d'un autre côté l'action attractive est plus énergique sur le fer que sur l'acier, on les polarise en les mettant en contact par un bout avec un fort aimant permanent. Le R. P. Cecchi et MM. Siemens, de Lafollye, d'Arlincourt, etc., ont combiné à cet effet des électro-aimants très ingénieusement disposés, qui sont très employés dans les appareils de précision, mais nous n'en parlerons ici que pour mémoire, car ils n'ont pas été mis à contribution dans les électromoteurs. Nous en dirons

autant des électro-aimants Hughes dans lesquels les noyaux magnétiques de fer, étant fixés sur les pôles d'un aimant permanent très puissant, sont polarisés d'une manière constante et ne fonctionnent que sous l'influence des désaimantations temporaires déterminées par les bobines qui les recouvrent, action qui est d'une très grande sensibilité et peut déterminer des effets puissants parce qu'elle s'exerce au contact des deux pièces magnétiques. On a pu obtenir encore la polarisation des armatures en faisant de celles-ci des électro-aimants droits, mais on n'a guère employé ce moyen qu'en télégraphie, et assez rarement.

Électro-solénoïdes. — De toutes les réactions attractives échangées entre les courants, celle qui a été la plus appliquée est l'attraction exercée par un solénoïde sur une tige de fer que l'on enfonce légèrement à l'intérieur de l'hélice. Sous l'influence du courant magnétique qui se développe dans cette tige par son aimantation, il se produit entre les spires de l'hélice magnétique ainsi constituée et les spires du solénoïde ou de la bobine une attraction de courants parallèles qui tend à enfoncer la tige à travers la bobine et qui se manifeste jusqu'à ce que les deux extrémités de la tige se trouvent symétriquement placées par rapport à celles de la bobine elle-même. Par ce moyen, on obtient une course attractive considérable qui peut même être augmentée en cloisonnant, comme l'ont fait MM. Page et Marcel Deprez, la bobine et en effectuant plusieurs actions successives. Nous en verrons plus tard une application importante.

Cette réaction peut encore être augmentée en terminant les deux bouts de la bobine par des rondelles de fer, comme on le voit figure 21, parce qu'il s'ajoute alors à la réaction des courants parallèles l'attraction exercée sur les rondelles.

En remplissant la moitié de la bobine avec un noyau de fer, comme on le voit figure 22, on en fait un électro-aimant, et son action, en s'ajoutant à l'attraction du solénoïde dans la première moitié de la bobine, augmente beaucoup l'effet définitif.

Naturellement ce système peut être constitué par deux

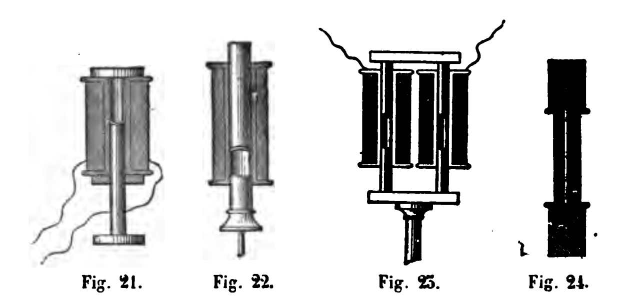


Fig. 21. Fig. 22. Fig. 23. Fig. 24.

bobines juxtaposées, comme on le voit figure 23, et le système électro-magnétique devient en fer à cheval, ce qui rend l'action encore plus forte. Enfin nous représentons (fig. 24) une armature électro-aimant, qui n'est qu'un électro-aimant droit terminé par des pôles épanouis plats pouvant s'adapter devant les pôles d'un électro-aimant.

Électro-aimants à fil nu. — Pendant longtemps on avait cru que les hélices magnétisantes des électro-aimants devaient être construites avec du fil de cuivre parfaitement isolé avec du coton ou de la soie; mais M. Carlier, en 1863, a montré qu'on pouvait en construire de tout aussi bonnes avec du fil de cuivre bien décapé et dépourvu de toute couverture; il fallait seulement avoir soin que les différentes rangées de spires fussent séparées par des feuilles de papier Dans ces conditions, on obtient de bons électro-aimants qui sont aussi énergiques que les autres quand la tension des courants employés n'est pas très considérable, mais qui ont le

grand avantage de ne pas fournir d'extra-courants très appréciables. Ces électro-aimants sont toutefois assez délicats à construire. A l'Exposition électrique de 1881 un inventeur américain, M. de Dion, avait montré des électro-aimants de ce genre construits avec des rubans de cuivre simplement oxydés qui avaient une puissance remarquable. Nous sommes étonné que les constructeurs n'aient pas fait un plus grand usage de ce genre d'organes électro-magnétiques.

Systèmes électro-magnétiques composés. — En dehors des combinaisons d'électro-aimants dont nous venons de parler, on a cherché à augmenter leur puissance et leur promptitude d'action par des dispositions particulières de leur noyau magnétique et de leurs armatures. Parmi ces dispositions nous mentionnerons celle qui consiste à composer le noyau magnétique de plusieurs tubes de fer cylindriques introduits les uns dans les autres et enveloppés chacun d'une hélice magnétisante plus ou moins épaisse dont les bouts sont réunis d'une hélice à l'autre. Ces électro-aimants sont dits alors à *noyaux multiples*, et ont été combinés de plusieurs manières par MM. Camacho et Cance, qui en ont obtenu de très bons résultats[1].

Dans le système de M. Camacho, les noyaux cylindriques sont constitués par des tubes de fer rivés sur la culasse de l'électro, et sont au nombre de 4 ou 5, plus un noyau central qui est en fer massif. Les hélices enroulées sur ces tubes sont généralement peu épaisses, sauf la dernière qui est extérieure et qui contient à elle seule plus de spires que toutes les autres ensemble. Elles sont généralement réunies en tension, c'est-à-dire de manière que le courant les parcoure successivement. Dans le sys-

1. Voir les deux Mémoires de M. du Moncel sur ces électro-aimants dans les comptes rendus de l'Académie des sciences des 28 juin et 5 juillet 1875.

tème de M. Cance ces noyaux cylindriques sont constitués par la juxtaposition d'un grand nombre de fils de fer, rangés circulairement au-dessus et en travers de chaque hélice, et qu'on serre le plus possible contre la culasse afin d'établir entre elle et ces sortes de chemises de fer un contact magnétique. Il est facile de comprendre que ces électro-aimants sont aussi faciles à construire que les électro-aimants ordinaires, puisqu'en définitive ces petits bâtons de fer peuvent être appliqués sur les différentes rangées de spires au fur et à mesure de leur enroulement, et l'hélice magnétisante n'a pas besoin pour cela d'être interrompue à chaque noyau tubulaire ainsi formé.

L'avantage de ces dispositions au point de vue physique est de diminuer considérablement le magnétisme rémanent par la division de la masse de fer en une infinité de petits aimants individuels qui s'aimantent et se désaimantent beaucoup plus rapidement que s'ils ne faisaient qu'une seule et même masse. Ils ont aussi une force supérieure par suite des réactions réciproques des tubes les uns sur les autres.

Ces mêmes avantages se retrouvent, et pour les mêmes raisons, avec les armatures composées de lames minces de fer, et qu'on a appelées *armatures multiples*. MM. Camacho et Chutaux ont fait des électromoteurs avec des systèmes de ce genre qui ont relativement bien réussi pour l'époque.

LOIS DES ÉLECTRO-AIMANTS.

Les premières données qui sont nécessaires à connaître quand on veut s'occuper des moteurs électriques sont les lois des électro-aimants, et elles peuvent être résumées ainsi qu'il suit :

1° La force propre d'un électro-aimant, ou son moment magnétique, est proportionnelle, pour une disposition et une résistance données du circuit, à l'intensité du courant, et, pour une même intensité électrique, au nombre des tours de spires de son hélice magnétisante. Enfin quand l'intensité électrique et le nombre des tours de spires restent constants et que les dimensions de l'électro-aimant varient seules, cette force est proportionnelle à la racine carrée du diamètre du noyau de fer et à la racine quatrième de sa longueur; de sorte que quand toutes ces quantités varient en même temps, le moment magnétique d'un électro-aimant a pour expression les valeurs de tous ces éléments multipliées les unes par les autres;

2° La force attractive exercée entre un électro-aimant et son armature, en raison de la réaction réciproque exercée par les deux pièces l'une sur l'autre, est proportionnelle aux carrés de toutes les quantités dont il a été question précédemment.

Si on discute mathématiquement les formules qui représentent ces valeurs, on reconnaît facilement qu'elles sont susceptibles de maxima, et les conditions auxquelles on doit satisfaire pour les obtenir peuvent être établies : 1° par rapport à la résistance à donner à l'hélice magnétisante; 2° eu égard au rapport qui doit exister entre l'épaisseur de l'hélice magnétisante et le diamètre des noyaux de fer; 3° par rapport à la longueur des noyaux de fer, et ces conditions de maximum peuvent être posées de la manière suivante :

1° Pour des électro-aimants de mêmes dimensions ayant des bobines de même diamètre, la grosseur du fil de l'hélice la plus convenable à enrouler sur eux est celle qui *rendra sa résistance égale à celle du circuit extérieur*, du moins si l'on ne prend en considération que le fil métallique dépourvu de sa couverture isolante;

2° Si l'on tient compte de l'épaisseur de cette cou-

verture, l'hélice la plus convenable est celle dont *la résistance sera à la résistance du circuit extérieur comme le diamètre du fil nu est à celui du même fil revêtu de sa couverture isolante;*

3° Entre plusieurs bobines électro-magnétiques enroulées avec le même fil, mais ayant un nombre différent de tours de spires, celle qui fournira les meilleurs résultats sur un circuit de résistance donnée sera la bobine dont *la résistance sera à la résistance du circuit extérieur comme l'épaisseur de son hélice augmentée du diamètre du noyau magnétique est à la simple épaisseur de l'hélice;*

4° L'épaisseur de l'hélice magnétisante la plus convenable, pour un nombre donné de tours de spires, est celle qui représente *le diamètre du noyau magnétique;*

5° La longueur la plus favorable d'un noyau magnétique est celle qui correspond à 11 *fois son diamètre*, ce qui veut dire pratiquement que chacune des branches de l'électro-aimant doit avoir six fois son diamètre;

6° Si le circuit comporte des dérivations, la résistance d'un électro-aimant interposé sur l'une de ces dérivations devra être égale à la résistance totale du circuit extérieur, y compris les autres dérivations, mais en la supposant *prise en sens inverse*, c'est-à-dire comme si l'électro-aimant était substitué à la pile, et réciproquement;

7° Les calculs que l'on peut déduire de ces différentes lois et des formules qui y conduisent, permettent d'établir les lois suivantes qui sont d'une grande importance dans les applications électriques.

I. Pour des résistances de circuit égales, les diamètres d'un électro-aimant établi dans ses conditions de maximum doivent être proportionnels aux forces électromotrices des piles employées.

II. Pour des forces électromotrices égales, ces dia-

mètres doivent être en raison inverse de la racine carrée de la résistance du circuit, y compris la résistance de la pile.

III. Pour des diamètres égaux, les forces électromotrices doivent être proportionnelles aux racines carrées des résistances des circuits.

IV. Pour une force électro-magnétique donnée et avec des électro-aimants placés dans leurs conditions de maximum, les forces électromotrices des piles qui doivent les animer doivent être proportionnelles aux racines carrées des résistances du circuit.

Ces différentes lois ont été démontrées et développées dans un petit volume publié sous le titre de : *Détermination des éléments de construction des électro-aimants*, par M. Th. du Moncel. Elles ne sont toutefois vraies que pour les électro-aimants qui peuvent atteindre une saturation magnétique convenable. Quand ils ne le peuvent pas, soit par suite de leur grosseur trop grande, soit par suite de la brièveté du temps pendant lequel ils sont impressionnés par le courant, il n'en est plus de même, et *les hélices magnétisantes doivent toujours être alors moins résistantes que le circuit extérieur, et cela d'autant plus que le courant agit moins longtemps.*

Pour appliquer ces différentes lois à la construction d'un électro-aimant, on commence d'abord par déterminer le diamètre c de son noyau magnétique au moyen de la formule

$$c = \frac{E}{\sqrt{R}}\, 0{,}0159,$$

dans laquelle E représente la force électromotrice (en *volts*) de la pile qui doit animer l'électro-aimant, R la résistance du circuit extérieur en *ohms*, et le chiffre que l'on obtient est une fraction décimale du mètre. Connaissant c on a immédiatement la longueur de chacune des branches de l'électro qui est $6c$, soit $12c$ pour les

deux, puis on détermine le diamètre g du fil de l'hélice au moyen de la formule

$$g = \sqrt{f \sqrt{\frac{c^3}{R}\, 0{,}0000020106}},$$

dans laquelle f est un coefficient qui, pour les moteurs électro-magnétiques, est 1,4. Il exprime le rapport qui existe entre le diamètre g du fil recouvert et le diamètre $\frac{g}{f}$ du même fil dépourvu de sa couverture isolante. La longueur H de ce fil sera ensuite donnée par la formule $\frac{75{,}4.c^3}{g^2}$, et le nombre total des tours de spires par la formule $\frac{12.c^2}{g^2}$. Tous les nombres ainsi fournis exprimeront toujours, comme précédemment, des mètres ou des fractions décimales du mètre, sauf celui qui se rapporte aux tours de spires qui est un nombre abstrait.

Bien que dans un ouvrage aussi élémentaire que celui que nous publions aujourd'hui on doive éviter le plus possible les formules algébriques, nous avons cru devoir donner celles qui précèdent en raison de leur très grande simplicité et des grands services qu'elles peuvent rendre aux chercheurs.

Il existe encore un grand nombre de données sur les conditions de bonne construction des électro-aimants qui ont été énumérées dans l'ouvrage dont il a été question précédemment, et dont nous croyons devoir rappeler ici les principales. Nous les avons classées en trois catégories : 1° les conditions de force par rapport aux réactions extérieures qui peuvent stimuler ces organes magnétiques ; 2° les conditions de force par rapport à la forme et à la disposition des armatures ; 3° les conditions de force par rapport à la masse de fer des noyaux électro-magnétiques ; 4° les conditions de

bon groupement des éléments d'une pile par rapport à un circuit extérieur et à un électro-aimant donnés.

Les conditions de force par rapport aux réactions extérieures qui peuvent stimuler les électro-aimants peuvent se résumer dans ce principe : que si l'on surexcite la puissance magnétique de l'un des pôles d'un électro-aimant, soit par le rapprochement, soit par la mise en contact d'une masse de fer, on renforce dans une grande proportion la puissance attractive de l'autre pôle, et cela d'autant plus que cette masse de fer est plus grande et d'une surface plus développée. Il en résulte qu'une tige de fer dont l'extrémité est munie d'une hélice courte exerce au pôle recouvert par l'hélice une action attractive plus énergique que si le fil de cette hélice était enroulé sur toute la longueur du barreau. Cette propriété peut être souvent mise à contribution dans les moteurs électriques à électro-aimants droits, et explique pourquoi un électro-aimant à deux branches, dont une seule est recouverte par l'hélice magnétisante, est aussi énergique pour une même résistance d'hélice qu'un électro-aimant de mêmes dimensions ayant deux hélices.

Les conditions de force par rapport à la forme et à la disposition des armatures peuvent être ainsi formulées :

1° La force attractive, à distance, des électro-aimants quels qu'ils soient, est d'autant plus grande que la surface de leur armature qui reçoit le plus directement l'influence magnétique est plus développée et que la masse de fer exposée à cette influence est mieux mise en rapport avec l'énergie magnétique de l'électro-aimant ;

2° Il résulte de là que l'attraction des électro-aimants à deux branches est plus forte à *distance* avec des armatures prismatiques *disposées à plat* devant les pôles de l'électro-aimant qu'avec des armatures *disposées sur champ*, mais l'inverse a lieu quand l'attraction s'effectue au contact. M. Jamin a expliqué cette particularité. Pour l'at-

traction à distance, les effets produits peuvent être entre eux dans le rapport de 59 à 92 ;

3° La disposition électro-magnétique dans laquelle les armatures se meuvent angulairement par rapport à la ligne des pôles de l'électro-aimant, c'est-à-dire sont articulées par l'une de leurs extrémités dans le voisinage de l'un des pôles de l'électro-aimant, est beaucoup plus favorable que celle dans laquelle les armatures se meuvent parallèlement à cette ligne, ce qui les suppose adaptées en croix à l'extrémité d'un levier basculant. Cet avantage est surtout manifeste pour les électro-aimants boiteux, dont la force peut varier dans le rapport de 125 à 64 ;

4° Les armatures prismatiques sont attirées avec d'autant plus de force que leur surface est plus grande, mais la forme de ces surfaces a une immense influence sur cette attraction, à cause de la distance moyenne de tous les points qui subissent l'influence de l'électro-aimant, laquelle distance peut varier considérablement suivant cette forme. Ainsi une armature cylindrique, de même surface qu'une armature prismatique, est attirée avec beaucoup moins de force que cette dernière, et le rapport de ces forces peut être comme celui des nombres 85 et 44.

5° Par suite d'une réaction analogue à celle qui précède, l'*attraction latérale* des électro-aimants dont les noyaux ressortent un peu des bobines est infiniment *moins énergique que l'attraction normale*, c'est-à-dire que celle qui est exercée dans le sens des axes de ces noyaux, le rapport de ces forces est comme celui des nombres 33 et 18 ;

6° Les armatures constituées par des aimants persistants ne facilitent l'attraction que quand elles sont disposées à distance, de manière à se mouvoir parallèlement à la ligne des pôles de l'électro-aimant. Dans les autres cas, l'inverse a lieu, attendu que l'action magnétique

exercée sur le fer est beaucoup plus énergique que celle exercée sur l'acier;

7° La force attractive due à la fermeture momentanée d'un courant est toujours, pour une même distance d'écartement de l'armature, plus grande que celle provenant de l'action continue du même courant qu'on chercherait à vaincre en augmentant la force antagoniste. Ce fait doit être rapporté à des effets de force vive et aux effets de polarisation de la pile. Le rapport des forces attractives dans les deux cas est comme celui des nombres 136 et 95;

8° Lorsque la force attractive d'un électro-aimant se divise entre plusieurs armatures, la force attractive totale est augmentée, mais la force individuelle de chacune d'elles est d'autant plus affaiblie que leur nombre est plus grand. Toutefois, cette augmentation ne se manifeste que jusqu'à une certaine limite, qui est atteinte quand la masse de l'armature est égale à celle de l'électro-aimant;

9° La force attractive d'un électro-aimant et d'une armature qui n'ont pas encore servi est plus considérable, pour une force électrique donnée, que celle du même électro-aimant et de la même armature qui ont subi préventivement une forte aimantation, et, pour obtenir de ce même électro-aimant et de cette même armature une force à peu près égale à celle qu'ils produisaient primitivement, il faut renverser le sens du courant; encore cette plus grande puissance n'existe-t-elle que pour la première fermeture du courant. Cela tient à des effets de condensation magnétique qui se produisent aux points de l'électro où les noyaux magnétiques touchent la culasse;

10° La force répulsive exercée par les électro-aimants sur des armatures aimantées est bien loin de correspondre à la force attractive qui peut être exercée sur elles par le renversement des pôles de l'électro-aimant. Ce fait, reconnu dès l'origine des études magnétiques et qui est

longuement discuté par M. Mussembroeck et l'abbé Nollet, s'explique aisément par la réaction de l'aimant agissant comme induisant, laquelle réaction tend à développer sur l'armature une polarité contraire à celle qu'elle possède. Or, dans l'effet attractif, cette réaction s'effectue dans le même sens que la réaction dynamique de l'aimant, tandis qu'elle s'effectue en sens opposé dans le cas de la répulsion ;

11° Lorsque les noyaux de fer d'un électro-aimant dépassent les bobines magnétisantes, la force de chacun de ses pôles est amoindrie, mais si l'on adapte à ces noyaux des semelles de fer occupant l'intervalle interpolaire, la force attractive des deux pôles agissant simultanément augmente, et le maximum de cet accroissement a lieu quand la distance séparant les deux semelles atteint environ le quart de l'intervalle interpolaire. Cela tient à la plus grande surface attractive des pôles magnétiques, qui correspond alors presque entièrement à celle de l'armature ;

12° D'après les expériences de M. Dub, les meilleures conditions des électro-aimants, par rapport à leurs armatures, et eu égard aux dimensions relatives, sont obtenues quand les différentes parties de l'ensemble électro-magnétique (branches de l'électro-aimant, culasse et armatures) sont égales et de même masse ;

13° Cette conclusion est naturellement subordonnée aux conditions de l'application, car il est certain que, si l'on veut obtenir de l'armature des mouvements prompts, il faudra une armature légère ; mais alors on peut y suppléer en garnissant les pôles de semelles de fer.

Les conditions de force des électro-aimants par rapport à leur masse peuvent se résumer en ceci : c'est que la partie intérieure des noyaux magnétiques est le plus souvent inutile, eu égard à l'attraction qu'ils exercent, pourvu qu'ils présentent la même surface extérieure. Ainsi un électro-aimant à noyaux tubulaires aura la même

force qu'un électro-aimant à noyaux massifs, si les bouts des tubes constituant les pôles sont munis de bouchons ou de semelles de fer d'une épaisseur égale à celle des tubes. Cette épaisseur, toutefois, doit dépendre de la force électrique que l'on emploie, car la couche magnétisée est d'autant plus profonde que l'action aimantante est plus énergique.

Comme le magnétisme rémanent est en rapport avec la masse du fer, on a grand intérêt, pour rendre les alternatives d'aimantation et de désaimantation plus promptes, d'employer des électro-aimants à noyaux creux garnis de semelles ou de bouchons de fer, et cet avantage est d'autant plus marqué que les interruptions du courant sont plus promptes. C'est pourquoi les électro-aimants à noyaux tubulaires multiples sont si avantageux; toutefois dans ces derniers, les bouchons de fer ne sont pas nécessaires, ils sont même désavantageux.

Les effets du magnétisme rémanent doivent être distingués de ceux du magnétisme condensé; les premiers résultent de l'impureté du fer qui lui donne une force coercitive capable de garder du magnétisme à la manière des aimants permanents. Les seconds proviennent d'une réaction analogue à celle qui se produit dans la bouteille de Leyde, et qui fait que l'orientation des polarités moléculaires des parties en contact des deux organes magnétiques, ayant été développée dans des conditions d'équilibre en rapport avec l'action exercée par l'organe aimanté se trouve maintenue après que la cause aimantante a disparu, par suite de la réaction réciproque des polarités mises ainsi en présence. Il résulte de cet effet, que dans un système électro-magnétique fermé, une partie du magnétisme développé se trouve en partie dissimulée, et ne peut redevenir libre que par la disjonction du système ou une action magnétique en sens inverse.

Les effets des aimants peuvent, du reste, être *statiques* ou *dynamiques*. Souvent ils marchent parallèlement, mais

quelquefois ils sont en sens contraire. Les effets d'attraction sont généralement des effets *statiques* se rapprochant plus ou moins des effets électriques, et ils ont pour origine une action par influence qui déplace les axes des polarités moléculaires, pour les placer dans une position d'équilibre en rapport avec l'effet produit. Ils ont pour centre d'action les pôles magnétiques. Les effets dynamiques sont les réactions provoquées entre le solénoïde magnétique qui, suivant la théorie d'Ampère, envelopperait le noyau magnétisé comme une spirale électrique. Le centre d'action de ces effets correspond à la ligne neutre du noyau magnétisé, et les effets produits sont de même nature que ceux qui s'échangent entre des courants électriques cheminant à travers des hélices. Les courants induits déterminés par les aimants appartiennent à ce genre de réactions, et sont l'expression de la réaction extérieure du courant magnétique, réaction qui peut s'effectuer sur tous les corps conducteurs. Il en est de même de la réaction statique polaire, mais elle peut être différente suivant la nature des corps, qui, selon qu'ils sont *magnétiques* ou *diamagnétiques*, sont attirés ou repoussés.

Quant aux conditions de force qui se rapportent à la meilleure disposition à donner au groupement des éléments de pile appelés à réagir sur des électro-aimants donnés, elles résultent de calculs de maxima analogues à ceux qui ont été entrepris pour connaître les meilleurs conditions de construction des électro-aimants eux-mêmes; on peut les résumer en disant qu'il faut toujours disposer la pile de manière que sa résistance, augmentée de celle du circuit extérieur, soit égale à la résistance de l'électro-aimant. Si on appelle b le nombre des éléments disposés en quantité composant chaque groupe, a le nombre des groupes réunis en tension, on connaîtra immédiatement le nombre b des éléments de chaque groupe en divisant successivement par 4, par 9, par 16, etc., la résistance totale des n éléments dont la

pile se compose, et en voyant quel est celui des nombres ainsi obtenus qui se rapproche le plus de la résistance du circuit extérieur donnée. Le chiffre du diviseur correspondant, soit 4, soit 9, soit 16, indique le carré du nombre d'éléments en quantité de chaque groupe, et le nombre des groupes s'obtient en divisant le nombre total *n* des éléments par celui des éléments en quantité de chaque groupe.

Quand le générateur électrique et l'électro-aimant sont indéterminés, c'est la résistance inutile du circuit qui doit fixer sur ce que l'on a à faire, et par résistance inutile nous entendons celle des fils qui réunissent le générateur à l'organe actif (l'électro-aimant). Or si cette résistance est faible, comme cela a lieu pour les petits électromoteurs que l'on utilise à domicile, elle s'efface devant celle de l'électro-aimant, et on peut alors supposer l'électro-aimant combiné avec un fil assez gros pour nécessiter un groupement des éléments de pile en séries parallèles. Alors on peut connaître la meilleure disposition à donner à la pile en employant le moyen indiqué précédemment; mais si la résistance inutile du circuit est relativement grande, plus grande ou aussi grande que celle de tous les éléments de la pile réunis en tension, aucun calcul n'est nécessaire, et ces éléments doivent être toujours réunis en tension.

En général il est préférable d'employer cette dernière disposition de pile, car on compense la moindre quantité d'électricité qui passe par un plus grand nombre de spires que l'on donne à l'hélice magnétisante, et la pile s'use moins vite. En revanche les étincelles de l'extra-courant sont plus à craindre, et les interrupteurs sont plus vite détériorés. Il y a évidemment là une question d'appréciation qui est du ressort du constructeur, et en prenant des fils de 1 à 2 millimètres de diamètre pour les hélices électro-magnétiques, on est, je crois, dans les meilleures conditions.

MOYENS EMPLOYÉS POUR DIMINUER LES EFFETS NUISIBLES PRODUITS DANS LES ÉLECTROMOTEURS.

Comme nous l'avons déjà dit, les grandes causes de perturbation qui se sont présentées dans la construction des moteurs ont été : 1° les effets destructeurs de l'étincelle électrique sur les commutateurs; 2° la brièveté de la distance attractive des électro-aimants; 3° les courants induits de fermeture qui se manifestent en sens inverse des courants utilisés; 4° le magnétisme rémanent qui oppose une résistance à la marche du moteur, au moment où il devrait être libre; 5° la lenteur d'aimantation des électro-aimants un peu forts, qui a pour résultat de n'utiliser leur force que dans des conditions de minima d'action. On a proposé plusieurs moyens pour avoir raison de ces difficultés, mais on n'y est arrivé que très imparfaitement jusqu'au moment où on a pu utiliser comme moteurs les machines d'induction à courant continu, qu'on a trouvées être réversibles, et par conséquent dans les meilleures conditions possibles. L'étude de ces dernières machines sera, comme nous l'avons déjà dit, l'objet de la seconde partie de cet ouvrage, et nous nous bornerons ici à signaler les moyens mis en usage dans les premiers électromoteurs.

Moyens employés pour diminuer les effets de l'étincelle sur les interrupteurs. — Pour obtenir de la part d'un électro-aimant les alternatives d'aimantation et de désaimantation nécessaires à la production d'un effet mécanique, il faut nécessairement que le courant électrique qui le traverse soit interrompu et rétabli à l'aide d'un dispositif spécial, qui est appelé *interrupteur* ou *commutateur*, suivant que l'effet est simple ou accompagné d'une permutation d'organes magnétiques. Or, l'inter-

vention d'électro-aimants dans un circuit complique considérablement la question, en raison de l'étincelle d'induction qui résulte de la réaction des spires les unes sur les autres, et qui agit toujours d'une manière plus ou moins fâcheuse sur les lames métalliques destinées à produireles contacts sur les interrupteurs. En effet,quelque faible que soit cette étincelle, elle finit toujours, au bout d'un certain temps, par oxyder les points de contact, et augmenter ainsi considérablement la résistance du circuit de l'électro-aimant Si elle est forte, comme cela a lieu avec les courants intenses, non seulement les contacts sont oxydés, mais le métal qui les compose se trouve brûlé et détérioré, et bientôt l'interrupteur est mis hors de service. Quand il ne s'agit que d'un contact fait à la main et de courants d'intensité moyenne, on en est quitte pour nettoyer de temps en temps les points oxydés de l'interrupteur, et d'appuyer plus énergiquement dessus, mais si les interruptions résultent d'un effet mécanique déterminé par l'électro-aimant lui-même, comme dans les électromoteurs, il est loin d'en être ainsi, et il devient nécessaire de prendre des mesures pour éviter les effets désastreux qui peuvent en résulter.

On a proposé, pour éviter ces inconvénients, divers moyens qui peuvent être considérés à un double point de vue, à celui de l'atténuation de l'étincelle de la pile elle-même et à celui de l'étincelle de l'extra-courant, dû à l'intervention de l'électro-aimant, qui augmente considérablement la première en se joignant à elle.

Le plus ancien moyen qui a été mis en pratique pour affaiblir l'étincelle de la pile a été de diviser le courant sur l'interrupteur, et, en conséquence, au lieu de constituer les interrupteurs de deux pièces métalliques uniques, on en prend un plus ou moins grand nombre que l'on met en rapport avec le conducteur du courant à l'aide de ramifications plus ou moins multipliées, mais qui doivent avoir à peu près la même résistance, afin que

le courant ne se porte pas plutôt sur l'un des contacts que sur les autres. Ce système, souvent employé par M. Froment, avait en outre l'avantage de fournir de meilleurs contacts, puisque si l'un, par une circonstance quelconque, était mauvais, les autres le suppléeraient plus ou moins. C'est cette considération qui a donné, il y a quelques années, l'idée d'employer comme pièces de contact des balais de fils métalliques, organes aujourd'hui usités dans presque toutes les machines d'induction et les moteurs électriques.

Toutefois, si ce moyen permettait d'affaiblir l'étincelle directe de la pile, il était insuffisant pour détruire l'effet de l'extra-courant, et on a dû chercher des combinaisons qui pussent résoudre le problème à ce point de vue. On a pensé un moment à interposer en dérivation dans le circuit un condensateur de grande surface, comme on l'avait fait, dans le même but, dans la bobine d'induction de Ruhmkorff; puis, revenant au commutateur primitif d'Ampère, on a cherché à prendre pour pièces de contact un amalgame pâteux de platine et des tiges de platine, le tout plongé dans un liquide peu conducteur, tel que l'alcool; mais ces moyens avantageux pour les machines d'induction de la nature de celle de Ruhmkorff, n'ont pas donné de résultats satisfaisants pour les moteurs électriques, et l'on a dû chercher ailleurs une solution plus avantageuse.

L'une des plus simples a été l'emploi d'électro-aimants à fil nu, disposés d'après le système de M. Carlier et dont nous avons parlé page 14. Dans ces électro-aimants le contact des spires est assez imparfait, comme on l'a vu, pour empêcher, dans une certaine mesure, la dérivation du courant voltaïque à travers la masse du fil des bobines; mais il ne l'est plus assez pour empêcher la dérivation de l'extra-courant qui a beaucoup plus de tension, et alors celui-ci se trouve pour ainsi dire annulé par sa fermeture sur lui-même. Nous sommes étonné

que ce moyen si simple ne soit pas plus souvent employé, car il est très efficace.

Ce système de destruction de l'extra-courant a encore été employé sous une autre forme dans les dispositifs que nous représentons ci-dessous, et qui ont été combinés primitivement, en 1855, par M. Dering. Dans ces conditions, l'interruption du courant ne se fait plus sur le fil réunissant directement la pile aux électro-aimants, mais sur une dérivation établie entre les deux extrémités du fil des électro-aimants. Il faut alors que ces électro-aimants soient très résistants, afin que le courant, se bifurquant entre le circuit dérivé où est l'interrupteur et le circuit de l'électro-aimant, passe plutôt par le court circuit de la dérivation, au moment où l'interrupteur le ferme, que par celui de l'électro-aimant qui est beaucoup plus résistant. Dans la figure 25 les électro-aimants sont en CB, la dérivation en GFE et la pile en DA. Quand l'interrupteur F présente sa partie excentrique devant le ressort de contact, le courant passe par le circuit AEFGD, tandis que quand le contact est rompu en F, il passe par le circuit AFBCGD; mais comme le circuit est toujours fermé à travers l'un ou l'autre des circuits, l'étincelle de rupture devient moins dangereuse.

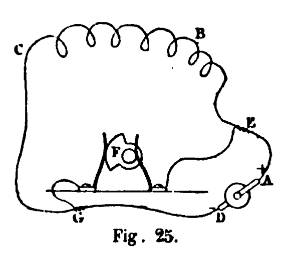
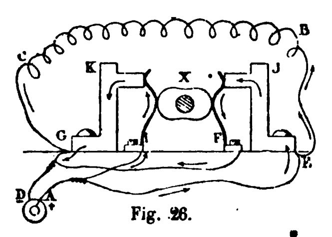


Fig. 25.

Bien que par le moyen qui vient d'être indiqué, le courant passe en presque totalité par la dérivation EG, une petite partie se dérive néanmoins à travers le circuit EBCG, et contribue à renforcer le magnétisme rémanent si nuisible dans les réactions mécaniques des électro-aimants. Pour empêcher cette dérivation, on a combiné le dispositif de la figure 26, qui est un peu plus compliqué et qui réagit alors comme un véritable interrupteur de courant. L'inspection de cette figure suffit du reste

pour qu'on puisse comprendre son mode de fonctionnement. Nous devons dire toutefois que tous ces systèmes sont d'un emploi difficile à cause de la forte résistance que l'on doit alors donner aux électro-aimants.


Fig. 26.

La disposition des frotteurs dans les commutateurs des électro-aimants n'est pas indifférente ; on en a employé de bien des formes, depuis le galet cylindrique ou conique, jusqu'au pinceau ou balai composé d'un faisceau de fils métalliques dont nous avons déjà parlé. C'est encore ce dernier système auquel on revient toujours, parce que, en l'employant, on est toujours sûr, au milieu des contacts multiples qui sont produits, d'en obtenir quelques-uns réellement bons. Ils divisent d'ailleurs l'étincelle, s'usent moins vite que les frotteurs à simples lames divisées, et ils peuvent, au moyen d'un dispositif assez simple, être allongés au fur et à mesure de leur usure.

Moyens d'augmenter l'étendue de la course attractive des organes électro-magnétiques. — L'une des grandes difficultés que l'on rencontre dans l'application de l'électro-magnétisme comme organe moteur, est la brièveté excessive de la course que peuvent accomplir les pièces qui subissent les effets de l'attraction électro-magnétique ; aussi depuis longtemps a-t-on cherché à augmenter, soit par des moyens mécaniques, soit par des moyens physiques, l'amplitude de cette course, et on y est plus ou moins arrivé par divers moyens que nous allons rapidement passer en revue.

La force attractive électro-magnétique décroissant avec les distances auxquelles elle s'exerce, à peu près comme

les carrés de ces distances et même plus, on a cherché d'abord à profiter de la rapidité de cette décroissance de force pour augmenter l'amplitude du jeu des pièces mises en mouvement. Il suffisait pour cela de faire réagir les armatures des électro-aimants sur les pièces destinées à la transformation du mouvement par l'intermédiaire de leviers plus ou moins longs. Comme l'affaiblissement de la force causé par l'allongement de ces leviers était beaucoup moindre que l'affaiblissement de l'attraction par suite de l'éloignement de l'armature, il en résultait que cet éloignement pouvait être rendu peu considérable, tout en fournissant un jeu mécanique assez étendu. Toutefois, plusieurs inconvénients, entre autres la perte de course par suite du jeu des leviers dans leurs articulations, la flexion de ces leviers et l'inégalité de l'action attractive qui atteignait son maximum alors même qu'elle devait cesser spontanément, firent renoncer bientôt à ce système d'amplification de la course des armatures dans les électromoteurs. On chercha alors à faire réagir directement l'attraction sur l'organe mobile en armant celui-ci de palettes de fer doux et en échelonnant autour de lui un certain nombre d'électro-aimants, de manière que le courant circulant successivement de l'un à l'autre et surprenant les armatures dans des positions très rapprochées, l'attraction pût s'exercer à petite distance. On fit plus même, on rendit la roue motrice mobile à l'intérieur d'une circonférence garnie d'électro-aimants, et cette roue, en sautant d'un électro-aimant à l'autre, réagissait elle-même sur une manivelle fixée à l'arbre du moteur. Mais ces systèmes avaient encore de nombreux inconvénients qui tenaient d'abord à la trop grande rapidité des interruptions du courant, rapidité qui empêchait les électro-aimants de réagir avec leur maximum de force; en second lieu à la création de courants d'induction énergiques qui, en réagissant en sens contraire du courant effectif, affaiblissaient l'action de celui-ci; enfin les effets

du magnétisme rémanent, qui étaient un obstacle considérable à la marche du moteur.

Après ces différentes combinaisons des électro-aimants, on pensa à substituer à leur action les effets dynamiques des courants, particulièrement l'attraction des cylindres de fer à l'intérieur des hélices magnétisantes. De cette manière, on évitait les effets du magnétisme rémanent, et on obtenait une course attractive convenable; mais le peu d'énergie de cette force fut encore un sujet de déception pour ceux qui appliquèrent les premiers ce système électro-magnétique. Il en fut de même de la force directrice des électro-aimants, par laquelle les armatures, se mouvant tangentiellement à leurs pôles, se trouvent attirées jusqu'à ce que leur ligne médiane coïncide avec la ligne axiale des électro-aimants. On put obtenir, il est vrai, par cette disposition, jusqu'à 14 centimètres de force attractive; mais cette force se trouvait réduite, eu égard à l'attraction normale, dans le rapport de 33 à 6. Ce fut alors que plusieurs physiciens songèrent à tirer parti de l'accroissement considérable de la force attractive, à mesure que l'armature s'approche de l'électro-aimant, soit pour augmenter la force attractive initiale en la rendant uniforme, soit pour faire fonctionner plusieurs mécanismes amplificateurs de la course de l'armature, et ces systèmes furent appelés *répartiteurs électriques.*

Nous ne décrirons pas avec détails ces systèmes dont les plus importants sont ceux de MM. Robert Houdin et Froment, car ils n'ont guère été appliqués qu'en horlogerie et dans quelques applications électriques de précision. On en trouvera d'ailleurs la description complète dans l'*Exposé des applications de l'électricité;* nous dirons seulement que, dans le répartiteur de M. Robert Houdin, que nous représentons figure 27, l'armature réagit sur les pièces destinées à être mises en mouvement par l'intermédiaire de deux bascules courbes, appuyées l'une

sur l'autre et disposées de manière que leur point de tangence, en se déplaçant par suite de l'abaissement de l'armature, l'action de celle-ci par rapport à la résistance puisse s'effectuer sur un bras de levier de plus en plus court et décroissant dans le rapport des carrés des distances successivement parcourues par l'armature. Il en résulte que, au moment où l'armature est le plus éloignée de l'électro-aimant, la force attractive, agissant à l'extrémité d'un long bras de levier, se trouve considérablement augmentée, tandis qu'au moment où l'armature

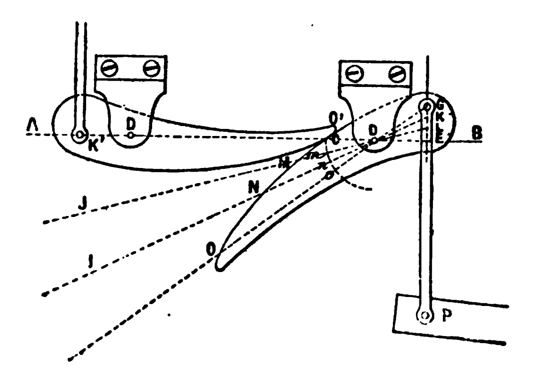


Fig. 27. — Répartiteur de M. Robert Houdin.

touche l'électro-aimant, cette force se trouve considérablement diminuée par suite de sa réaction sur un bras de levier beaucoup plus court. Or, comme cette répartition de la force s'est effectuée dans le rapport de la force attractive elle-même, on peut, pour une force donnée, exercer une action sur une armature à une distance beaucoup plus grande que dans les dispositions ordinaires, et la force est à peu près uniforme dans tout le parcours des pièces mobiles.

Dans le répartiteur de M. Froment que nous représentons figure 28, l'armature est suspendue à une sorte

de bielle articulée à un levier pivotant autour d'un centre fixe, et le levier destiné à réagir sur la pièce à faire mouvoir est articulé lui-même au point d'articulation des deux autres tiges; il en résulte que si le système est disposé de manière que les deux premières pièces articulées forment entre elles un certain angle quand l'armature est la plus éloignée de l'électro-aimant, ces deux pièces, en se redressant, à mesure que l'armature est attirée, font décrire à leur point d'articulation, et par conséquent au levier moteur, une course qui est représentée par le sinus d'un arc dont la distance attractive représente la flèche; il y a donc amplification de la course du levier moteur, et en même temps répartition de la force, car à mesure que le système se redresse, la force mise en jeu doit augmenter considérablement de puissance pour produire un même effet mécanique.

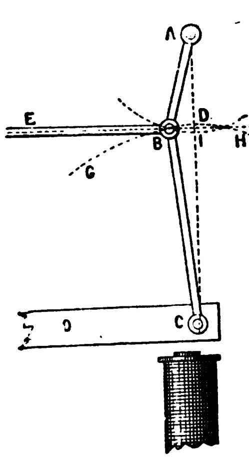


Fig. 28. — Répartiteur de M. Froment.

Un diminutif de ce système a été appliqué dans le moteur de M. Roux que nous décrirons bientôt.

Comme amplificateur de la course attractive des armatures, nous citerons encore le système de MM. Pellis et Henry qui paraît être une modification de celui d'Hjorth et qui consiste à employer, comme on le voit figure 29, des électro-aimants à pôles coniques, réagissant sur des armatures en forme d'entonnoir dans lesquelles ils peuvent s'enfoncer. Dans ces conditions, la distance attractive est représentée par l'espace qui sépare la paroi intérieure de l'armature creuse du pôle conique, dis-

tance qui diminue successivement à mesure que l'armature s'enfonce, et la course effectuée par celle-ci est d'autant plus grande que le pôle conique est plus aigu.

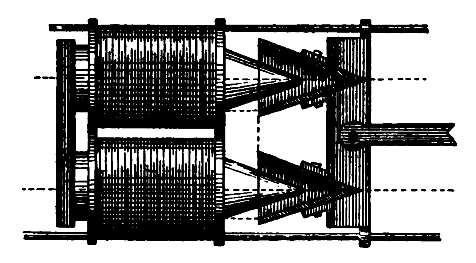


Fig. 29. — Amplificateur de MM. Pellis et Henry.

On obtient un effet analogue en donnant à l'armature la forme d'un coin et en la disposant entre les pôles d'un électro-aimant taillés en biseau, de manière à correspondre à ce coin. Nous verrons plus tard un moteur de M. Froment fondé sur ce principe.

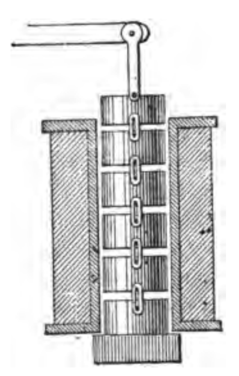


Fig. 30. — Amplificateur de M. Perrin.

Dans un système combiné par M. G. Perrin, on a constitué le noyau de fer des électro-aimants par une sorte de chapelet de cylindres de fer (figure 30) réunis l'un à l'autre par des chaînons allongés capables de maintenir ensemble tous ces cylindres superposés. Ce chapelet étant placé à l'intérieur d'une bobine magnétisante pouvait se contracter sous l'influence du passage du courant électrique dans la bobine et des aimantations individuelles des cylindres qui en étaient la conséquence; et comme ces attractions étaient en nombre égal à celui des cylindres, on pouvait obtenir une con-

traction dont l'étendue correspondait à la somme de tous les intervalles séparant les cylindres. Naturellement, cette plus grande course n'était obtenue qu'au préjudice de la force électro-magnétique développée, car ces cylindres courts ne pouvaient avoir qu'une faible puissance magnétique.

Moyens d'éliminer les effets des extra-courants de fermeture. — Les extra-courants qui naissent dans les électro-aimants au moment des interruptions et des fermetures du courant ne pouvant être supprimés, on a cherché à détourner leur action nuisible en les combattant par des effets secondaires. MM. d'Arlincourt, Lenoir et Billet ont proposé à cet effet plusieurs dispositifs qui, bien que n'ayant résolu que très incomplètement le problème, surtout pour les électromoteurs, méritent cependant d'être mentionnés. Dans le système de M. Lenoir, l'électro-aimant est recouvert d'une seconde hélice en fil fin destinée à être induite par l'électro et à fournir des courants induits qui, étant dirigés à travers le fil de l'électro-aimant en sens contraire du courant qui anime celui-ci, peuvent, au moment des fermetures, renforcer le courant actif, et rendre plus promptes et plus faciles les désaimantations au moment des interruptions. Le système de M. d'Arlincourt est un peu analogue à celui que nous venons de décrire, et il paraît même qu'il l'aurait précédé. Celui de M. Billet est plus compliqué, mais il ne paraît guère applicable aux électromoteurs, car les hélices des électro-aimants sont enroulées dans deux sens différents à partir du milieu des bobines, et sont réunies d'une bobine à l'autre, précisément au point où se fait le changement de sens de l'enroulement. L'un des pôles de la pile est mis en rapport par deux fils avec les deux extrémités du fil de l'une des bobines, et l'autre pôle correspond aux deux extrémités du fil de l'autre bobine, et il résulte de la circulation du courant à travers un

tel système que l'aimantation est produite comme si le courant provenait de deux piles différentes, animant séparément, chacune dans le même sens, une moitié de l'électro-aimant. Or, les extra-courants résultant de cet arrangement se trouvent être alors dans un sens tel qu'ils se neutralisent réciproquement. Toutefois, une étude attentive de cette disposition montre que l'action n'est complète que pour les extra-courants de désaimantation. (Voir la description de ces systèmes dans l'*Exposé des applications de l'électricité*, de M. Th. du Moncel, tome II, p. 101 et 102, et tome V, p. 359.)

Moyens de diminuer les effets du magnétisme rémanent et de l'inertie magnétique. — Les moyens employés pour amoindrir les effets du magnétisme rémanent proprement dit, c'est-à-dire celui dû aux impuretés du fer, consistent à choisir des fers le plus doux possible, et à les faire recuire à plusieurs reprises, ou bien à employer certaines fontes grises qui, d'après M. Deprez, ont très peu de force coercitive ; mais pour les effets du magnétisme rémanent dû à la condensation magnétique, ils ne peuvent être détruits que par une action physique contraire, et le meilleur moyen est de lancer immédiatement, après l'interruption du courant, un faible courant de sens contraire. Un couple secondaire Planté, composé de deux petites lames de plomb et interposé dans le circuit des électro-aimants, d'après le système de M. Jacobi, résout assez bien le problème, et les courants induits contraires dont il a été question précédemment le résolvent également. Cependant, ces moyens ont été jusqu'ici peu employés dans les électromoteurs, et n'ont été mis à contribution que dans la télégraphie électrique. Il y aurait évidemment des essais à tenter dans cette voie. Nous avons d'ailleurs vu qu'en employant des électro-aimants dont la culasse était coupée par une pièce de cuivre, d'après le système de M. Hequet, on

pouvait amoindrir beaucoup leur magnétisme rémanent.

Quant aux inconvénients inhérents à l'inertie magnétique, le meilleur système est de diminuer la masse magnétique des électro-aimants, d'employer des électro-aimants tubulaires et des armatures composées de lames minces de fer juxtaposées les unes contre les autres, et d'effectuer quelques coupures dans les noyaux magnétiques et les surfaces métalliques qui les entourent; mais la meilleure de toutes les solutions est d'employer des systèmes électro-magnétiques dans lesquels le courant est continu comme dans les machines réversibles de Gramme, de Siemens, de Méritens et autres.

PREMIÈRE PARTIE

PREMIÈRE PHASE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

I. — UN COUP D'ŒIL HISTORIQUE

A qui revient l'honneur d'avoir appliqué, pour la première fois, l'électricité à la marche d'un moteur mécanique? C'est une question qu'il est bien difficile d'éclaircir d'une manière parfaitement nette. Depuis les tourniquets électriques construits en vue de rendre manifestes les réactions du fluide électrique, soit par l'effet de son écoulement à travers les pointes, comme les tourniquets des machines électriques, soit par l'effet d'attractions successives, comme le tourniquet à piles sèches de Zamboni, bien des savants ont dû chercher à diriger dans le même but les réactions dynamiques des courants, surtout lorsqu'ils purent constater la force considérable d'aimantation que peuvent développer ces sortes de réactions. S'il faut en croire un historique donné par le journal l'*Electrician* du 9 septembre 1882, le docteur Schulthess en aurait émis la première idée dans une lecture qu'il fit à une société de mécaniciens de Zurich, en 1832, et où il demande « si une force telle que celle que l'on obtient en interrompant le courant et en le rétablissant ensuite, ne

pourrait pas être appliquée avantageusement en mécanique. » Cette idée aurait porté ses fruits, car en janvier 1833 il aurait exposé, devant la même société de Zurich, une machine dans laquelle le principe posé par lui avait été appliqué intégralement. En novembre 1832, M. Salvator dal Negro, professeur de philosophie naturelle à l'Université de Padoue, publiait, de son côté, un mémoire dans lequel il indiquait les moyens d'appliquer l'électro-magnétisme à la mise en mouvement des machines. Enfin, en 1834, le professeur Jacobi, bien connu du monde savant et industriel par la découverte qu'il fit de la galvanoplastie, fit connaître la disposition d'un moteur électro-magnétique qui, établi un peu plus tard sur une grande échelle, lui permit d'accomplir sur la Néva ces belles expériences qui eurent tant de retentissement en 1838. Voici ce qu'il dit à ce sujet dans le mémoire qu'il publia sur ces expériences : « J'ai eu l'honneur, en novembre 1834, de présenter à l'Académie des sciences de Paris une note sur un nouvel appareil électro-magnétique. Cette note fut lue à la séance du 1er décembre, et un extrait fut imprimé dans le journal *l'Institut* du 3 décembre 1834 (nº 82)[1]. Depuis cette époque,

1. Voici cet extrait tel qu'il est imprimé dans le journal *l'Institut*, tome II, p. 394 ; on pourra voir plus loin la représentation de cette machine avec les perfectionnements qui lui ont été apportés en 1838.

« M. Jacobi, de Kœnisberg, adresse à l'Académie une note sur une *machine magnétique* de son invention dans laquelle le magnétisme est employé comme force motrice. Voici la description qu'il donne de cette machine :

« L'appareil consiste en deux systèmes composés de 8 barres de fer doux, longues de 7 pouces et ayant un pouce d'épaisseur. Ces deux systèmes sont placés à angle droit et symétriquement l'un par rapport à l'autre sur deux disques de manière que les bouts ou pôles des barres se trouvent vis-à-vis les uns des autres. L'un de ces disques est fixe pendant que l'autre tourne autour d'un axe, et fait passer le système mobile des barres le plus près possible de celles du système fixe. Les 16 barres sont enroulées de 320 pieds de fil de cuivre d'une ligne et un quart d'épaisseur dont les bouts sont en contact métallique avec les pôles d'un appareil voltaïque. La masse totale mise en mou-

MM. Botto[1] et dal Negro ont réclamé la priorité de l'invention, et la communauté d'idées dans laquelle je me trouve avec des hommes aussi distingués est une preuve de plus en faveur de l'importance de cette nouvelle force motrice. »

A partir de ses premières expériences, Jacobi ne cessa de continuer ses recherches, et, en 1838, avec des fonds qui lui furent donnés par l'empereur de Russie, il con-

vement avec une vitesse de six pieds par seconde, s'élève à environ 50 livres, ce qui forme une force vive assez considérable. Le travail utile fourni par cet appareil et mesuré par un frotteur analogue au frein de M. Prony équivaut à un poids de 10 à 12 livres élevé à la hauteur d'un pied par seconde. Ce succès est dû principalement à une construction nouvelle de *gyrotrope* ou commutateur par lequel s'opère le changement des pôles, changement qui a lieu 8 fois pendant une révolution entière, c'est-à-dire 8 fois en $\frac{1}{2}$ ou $\frac{3}{4}$ de seconde, vitesse ordinaire de l'appareil lorsque l'eau qui forme le liquide conducteur est assez peu acidulée pour que le développement des gaz soit à peine appréciable. »

1. Voici la description du moteur de M. Botto telle qu'elle a été publiée dans le journal *l'Institut* du 3 décembre 1834, p. 400.

« Le mécanisme dont il fait usage se compose d'abord d'un levier mis en mouvement à la manière d'un métronome, par l'action alternante de deux cylindres électro-magnétiques fixes s'exerçant sur un troisième cylindre mobile attaché au bras inférieur du levier. Le bras supérieur entretient dans un mouvement giratoire continu une roue métallique qui sert de régulateur selon le mode ordinaire. L'appareil est disposé de manière que les axes des trois cylindres parfaitement égaux étant situés dans un même plan vertical perpendiculaire à l'axe du mouvement, le cylindre oscillant vienne se placer alternativement, par une de ses extrémités, au contact et dans la direction de l'un et l'autre des deux autres cylindres placés aux limites de ses excursions; et chaque fois, à cet instant même, la direction du courant magnétisant dans la spirale est changée, le reste du circuit conservant la même direction de manière à produire des pôles de même nom dans les cylindres fixes, aux deux extrémités situées en regard du cylindre mobile. Le changement de direction s'obtient à l'aide d'une bascule dont le mouvement même de la machine intervertit les communications. Par suite de cette disposition, le cylindre du milieu subit des alternatives conspirantes d'attraction et de répulsion, en vertu desquelles l'appareil se met en mouvement comme de lui-même, et s'y maintient activé par l'économie des forces magnétiques qui proviennent des courants électriques. »

struisit sa grande machine que nous décrirons plus tard et entreprit sa grande expérience de navigation électrique. Le bateau employé par lui était une chaloupe de 10 rameurs, munie de roues à palettes auxquelles le mouvement de rotation était communiqué par sa machine électro-magnétique que nous représentons, du reste, figure 31. Il y avait généralement à bord 10 à 12 personnes, et les promenades se faisaient pendant des journées entières. Toutefois, les difficultés qu'il rencontra dans la marche du générateur électrique et l'imperfection de construction du moteur étaient souvent des causes d'interruption auxquelles il était bien difficile de remédier sur place. Cependant quand elles furent surmontées, M. Jacobi put estimer le travail produit, et il est arrivé à établir qu'une batterie de plaques de platine de 20 pieds carrés de surface pouvait, par ce moyen, fournir une force d'un cheval; il espérait toutefois obtenir le même résultat avec une surface de batterie moitié moindre. La chaloupe, d'après les rapports faits à cette époque, marchait avec une vitesse de 4 milles par heure, résultat supérieur à celui obtenu lors des essais des premiers petits bateaux à vapeur. La chaloupe, au dire de M. Jacobi, avait 28 pieds de longueur, 7 pieds et demi de largeur et un tirant d'eau de 2 pieds trois quarts. Lors des expériences de 1839, la machine qui occupait un petit espace était actionnée par une batterie de 64 couples de platine, ayant chacun 36 pouces carrés de surface et chargés, d'après le système de Grove, avec de l'acide nitrique et de l'eau acidulée. Quand le bateau, chargé de 12 à 14 personnes, marchait à contre-courant, il pouvait parcourir 3 milles par heure. Si on compare ces résultats à ceux obtenus en 1838, on peut constater qu'il s'était accompli déjà de grands progrès, car dans les premiers essais il fallait employer une batterie près de cinq fois plus grande. Ces particularités ont été mentionnées dans une lettre écrite par le professeur Jacobi à Faraday, le 21 juin 1839, et

qu'on peut lire dans *the London and Edinburgh philosophical Journal* du mois de septembre 1839[1].

La publication de cette lettre provoqua de la part du professeur Forbes, de King'College, d'Aberdeen, une lettre au docteur Faraday datée du 7 octobre 1839, dans laquelle, voulant faire honneur à son pays, il donne le compte rendu détaillé des travaux entrepris sur le même sujet par un habitant d'Aberdeen, M. Robert Davidson.

D'après cette lettre, il paraîtrait qu'à l'époque des expériences de M. Jacobi, c'est-à-dire en 1839, ce Robert Davidson avait un tour et une petite voiture locomotive pouvant marcher par l'électricité. Sa voiture même aurait pu transporter deux personnes en roulant sur des planches en bois rugueux, et on prétend qu'il serait facile de prouver qu'on aurait travaillé à la construction de ces machines deux ans avant l'époque dont il vient d'être question. Quoi qu'il en soit, il paraîtrait que M. Davidson ne s'en serait pas tenu à l'invention de son moteur, il aurait aussi apporté quelques perfectionnements aux piles de Daniell dans leur application aux électromoteurs, et il aurait déterminé la meilleure nature du fer à employer pour ce genre d'application. Bien que M. Forbes, à cette époque, eût fait des démarches auprès des administrations des chemins de fer, pour aider pécuniairement M. Davidson dans ses recherches si importantes et si coûteuses, c'est lui qui en supporta, dans l'origine, tous les frais, et il arriva à pouvoir montrer à Édimbourg des machines à scier et à tourner le bois, une presse à imprimer et une locomotive actionnées par la force électro-magnétique. Ce n'est que plus tard, en 1843, qu'on lui vint en aide.

1. On trouve du reste de nombreuses données très intéressantes sur la question des moteurs à cette époque, dans le mémoire de M. Jacobi lu à l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg en juin 1838, et dont un résumé se trouve dans le compte rendu de la session de Association britannique tenue à Glascow en septembre 1840.

En même temps que ces résultats étaient obtenus en Europe, les Américains, de leur côté, ne restaient pas inactifs. Suivant le journal anglais auquel nous empruntons quelques-uns de ces renseignements, un certain sieur Davenport, forgeron de Philadelphie, aurait combiné, en 1836, un moteur électro-magnétique qui aurait pu faire marcher un tour et une presse d'imprimerie, et cette presse aurait imprimé un journal fondé par l'inventeur sous le titre de *the electro-magnetic and mechanic Intelligence*. Toutefois, comme on trouve dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* du 8 juin 1840 une note de MM. Patterson, de New-York, sur une machine électro-magnétique appliquée, suivant eux, à l'impression d'un journal hebdomadaire chez M. Davenport, on peut croire que c'est à MM. Patterson et non à M. Davenport qu'il faut rapporter l'invention de la machine dont parle le journal anglais. Cette machine est décrite de la manière suivante dans les *Comptes rendus*.

« Des morceaux de fer doux sont placés à des intervalles égaux sur la circonférence d'une roue ; ils passent pendant la rotation de la roue tour à tour devant deux aimants électro-magnétiques. Les fils destinés à établir les courants sont liés à un mécanisme simple qui permet au courant électrique de s'établir au moment où le morceau de fer doux va arriver en présence de l'aimant. Lorsque le rapprochement est le plus complet, le courant est supprimé tout à coup. La roue continue à tourner par la vitesse acquise. Le courant n'est rétabli que lorsque plus de la moitié de l'espace qui sépare les morceaux de fer doux a été parcourue. L'attraction en commençant à volonté tantôt un peu avant, tantôt après ce point milieu, détermine et règle le sens dans lequel la roue continue de marcher. Il suffit donc pendant l'action de déplacer d'une petite quantité l'appareil qui sert à établir et à supprimer la communication électrique pour donner à la machine des mouvements inverses. La

machine est arrêtée et fixée en laissant le courant agir d'une manière continue; la suppression complète du courant remet la roue dans un état parfait de liberté.

« La puissance électrique de cette machine est empruntée à une pile de zinc amalgamé et de feuilles de plaqué d'argent recouvertes de platine par précipitation. Des feuilles de tôle de fer recouvertes également par une précipitation de platine peuvent avec avantage remplacer le plaqué d'argent. Ces éléments sont plongés dans de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique dans la proportion de neuf parties d'eau et une partie d'acide. »

En 1838 le capitaine américain Taylor prit une patente pour un moteur électro-magnétique qui fut breveté d'un autre côté en Angleterre le 2 novembre 1839. On peut voir la description de ce moteur accompagnée de dessins dans le *London mechanic Magazine*, tome XXXII, page 694, et un modèle capable de fonctionner se voit encore dans l'Exposition du Coloseum à Londres, où il est employé à tourner le bois, l'ivoire et même le métal. Cette machine était plus simple que celle de Davidson construite à peu près à la même époque (sinon à une époque plus reculée). Le système employé pour les interruptions et fermetures du courant était à peu près le même dans les deux machines.

Nous allons à l'instant décrire le moteur de M. Davidson; mais pour compléter notre historique de l'invention des moteurs électriques, nous devons rappeler qu'entre les années 1841 et 1844 un certain nombre de moteurs électriques plus ou moins ingénieux par leur disposition furent mis au jour par MM. Wheatstone, Elias, de Harlem, et Froment. L'un des trois moteurs brevetés en 1841 par M. Wheatstone se rapprochait tout à fait de celui de M. Froment que nous représentons plus loin (fig. 36), et que l'on a regardé longtemps comme un des plus ingénieux qui aient été conçus; ce qui est curieux, ce même modèle a été réclamé par un inventeur hongrois

appelé M. Jedlick, comme ayant été inventé par lui en 1829, date que nous ne garantissons aucunement, et c'est encore ce modèle qui, ayant été établi sur une beaucoup plus grande échelle en 1856 par M. Marié Davy, a été l'objet d'un encouragement accordé par l'Académie des sciences.

II. — MOTEURS HISTORIQUES

Moteurs de MM. Jacobi, — Davidson, — Wheatstone, — Elias, — Froment, — Page, — Hjorth, — Pacinotti.

Les moteurs que nous allons décrire en ce moment sont ceux que l'on peut appeler historiques, car outre qu'ils ont eu un certain retentissement à l'époque où ils ont été créés, ils ont servi de types à une foule d'autres qui ont été imaginés depuis et qui n'en sont que des modifications plus ou moins complexes. Nous allons en conséquence les étudier par ordre chronologique en commençant par le moteur de M. Jacobi, le premier de tous, et dont nous n'avons indiqué précédemment que le principe.

Moteur de M. Jacobi. — Comme on l'a vu, M. Jacobi, en 1838, avait perfectionné le premier moteur dont il avait donné une description, en 1834, à l'Académie des sciences de Paris, et c'est ce moteur appliqué à sa barque sur la Néva que nous représentons figure 31. Cette fois il se composait de deux rangées circulaires d'électro-aimants en fer à cheval, portées par deux supports verticaux, et entre ces deux rangées pouvait se mouvoir autour d'un axe horizontal une sorte d'étoile à six branches portant six paires d'électro-aimants droits. L'axe portait un commutateur formé de quatre roues qui réglait le sens des courants dans l'appareil, de manière que lorsque les barreaux droits se trouvaient entre deux pôles consé-

cutifs d'électro-aimants en fer à cheval, ils fussent toujours attirés par l'un et repoussés par l'autre, le changement de sens ayant lieu au moment où les pôles mobiles se trouvaient en face des pôles fixes.

D'après des renseignements qui ont été publiés dans plusieurs journaux, les chiffres se rapportant aux expériences faites sur la Néva seraient les suivants :

Lors des premières expériences, on employait une pile de 320 couples de Daniell à acide sulfurique et sulfate

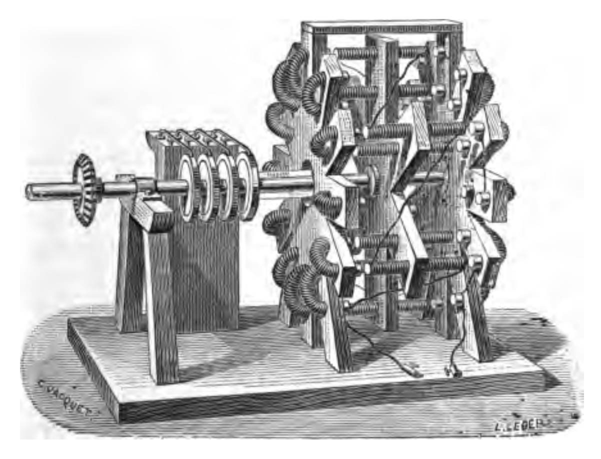


Fig. 31. — Moteur de M. Jacobi.

de cuivre dont les lames zinc et cuivre avaient chacune 225 centimètres carrés de surface, et la vitesse atteinte aurait été de 2300 mètres par heure. Lors des secondes expériences, faites en 1839, la pile se serait composée de 128 éléments Grove de même surface, et la vitesse aurait été de 4170 mètres par heure avec une charge de douze personnes. Les dimensions de l'embarcation auraient été $8^m,40$ en longueur, $2^m,25$ en largeur avec $0^m,90$ de tirant d'eau. Ces expériences auraient coûté à l'empereur Nicolas 60 000 francs.

Moteur de M. Davidson. — Le moteur que M. Davidson avait appliqué à sa locomotive appartenait à la classe de ceux que nous désignons aujourd'hui sous le nom d'*électromoteurs à mouvements directs* ; il était constitué par deux cylidres de bois adaptés aux essieux des quatre roues et munis de 4 systèmes d'armatures de fer disposées de manière à pouvoir tourner entre les pôles de huit électro-aimants en fer à cheval. Ces électro-aimants étaient fixés sur un même plan horizontal au fond du véhicule et étaient opposés deux par deux par leurs pôles contraires sur deux rangées parallèles, de sorte que chaque cylindre portait deux séries de barres de fer disposées parallèlement aux essieux et se présentant successivement, pendant la rotation des cylindres, aux pôles des électro-aimants opposés correspondants, mais de telle manière que quand l'une des barres arrivait d'un côté devant les pôles de l'électro-aimant de droite, une autre barre, du côté opposé, se trouvait placée à portée d'attraction de l'électro-aimant de gauche, et réciproquement. Il résultait de cette disposition que si après l'attraction produite le courant était interrompu dans l'électro-aimant actif et renvoyé dans l'autre électro-aimant du côté opposé, le mouvement d'abord produit se continuait successivement, et donnait lieu à un mouvement de rotation de l'essieu correspondant. Chacun des quatre systèmes d'armatures produisant le même effet, les actions s'additionnaient et pouvaient déterminer sur les deux essieux une certaine force qui a pu être utilisée à faire tourner les roues de la locomotive.

Les commutateurs destinés à interrompre et à fermer le courant étaient peu différents de ce qu'ils sont aujourd'hui ; seulement M. Davidson employait deux piles à auges placées transversalement aux deux extrémités du véhicule et qui agissaient l'une sur les électro-aimants de gauche, l'autre sur es électro-aimants de droite. A cet effet l'axe des roues portait, aux deux bouts, deux

petits cylindres métalliques sur lesquels appuyaient des frotteurs, mis en rapport avec une des piles et les électro-aimants appartenant à un même système. Ces cylindres étaient composés de deux parties, d'une partie pleine et d'une partie présentant sur sa circonférence des entailles en nombre égal à celui des armatures, et ces entailles étaient remplies d'ivoire. Le courant partant de la pile arrivait à l'un de ces cylindres par le frotteur appuyant sur la partie pleine, puis passait de là par les parties métalliques de l'autre partie du cylindre, pour regagner les électro-aimants de gauche ou de droite et retourner à la pile après les avoir traversés; mais comme à la suite du mouvement produit par ce passage du courant une des parties d'ivoire se présentait sous le frotteur, le courant était interrompu dans le système électro-magnétique qui avait produit l'action et, n'étant plus retenu par l'attraction des armatures, le cylindre pouvait continuer son mouvement en raison de la vitesse acquise et de l'action du commutateur placé à l'autre bout de l'axe. La position de ce commutateur était, en effet, telle, qu'au moment où une partie d'ivoire se présentait sous le frotteur du premier commutateur, une partie métallique se présentait sous le second et provoquait la circulation du courant de la seconde pile à travers le second système d'électro-aimants.

Les piles employées par M. Davidson étaient celles de Sturgeon composées de plaques de fer et de zinc amalgamé de 15 pouces sur 12; chacune d'elles était divisée en deux parties pour que chaque système électro-magnétique eût sa pile séparée, et il y avait en tout 40 éléments montés à la manière des piles à auges de Wollaston. Cette pile, toutefois, dut être renforcée d'une pile supplémentaire de 19 couples qui fut montée sur la plate-forme de la voiture. La voiture avait 16 pieds de longueur sur 6 pieds de largeur et pesait 5 tonnes, y compris les piles et les mécanismes. La vitesse du mouvement

était, dit-on, d'à peu près 4 milles à l'heure. Les ingénieurs n'estimèrent qu'à une fraction de cheval l'effet ainsi produit sur une voie ferrée, mais l'auteur de la lettre qui a donné ces renseignements croit, d'après les effets produits par les petits moteurs de M. Davidson, que la force développée était beaucoup plus grande.

Les électro-aimants employés par M. Davidson étaient constitués par des plaques de fer assemblées; chacune des branches avait 25 pouces de longueur; les pôles rectangulaires avaient 8 pouces sur 5 et n'étaient éloignés que de 4 pouces. Les hélices magnétisantes étaient constituées par des faisceaux de fils recouverts de coton. Dans l'origine les pôles magnétiques étaient presque en contact avec les armatures quand elles passaient devant eux, mais l'énorme attraction normale qui se développait alors et qui faisait fléchir les supports, dut faire éloigner ces diverses pièces, ce qui naturellement entraîna une diminution dans la force développée, et cette circonstance découragea un peu l'inventeur qui ne donna pas de suite à ses travaux.

Moteurs de M. Wheatstone. — Les conceptions de M. Wheatstone étant toujours remarquables par leur ingéniosité, nous devrons décrire les différents modèles mentionnés dans son brevet du 7 juillet 1841, et comme nous aurons occasion de décrire plus tard celui dont il a été question précédemment (voir p. 60) et qui a figuré l'année dernière à l'Exposition électrique de Paris, nous ne nous occuperons, pour le moment, que des modèles représentés figures 7, 8, 9 et 10 de sa patente.

Dans l'un de ces moteurs, les électro-aimants étaient constitués par les dents très écartées d'une grande roue d'angle en fer, autour desquelles étaient enroulées les hélices magnétisantes, et la liaison de celles-ci avec la pile était effectuée de manière à présenter des pôles alternativement contraires. Il y avait 24 de ces hélices qui consti-

tuaient, couple par couple, une suite d'électro-aimants à deux branches, et la roue était fixée dans une position parfaitement verticale. Sur la surface conique constituée par les dents de fer jouant le rôle de noyaux électro-magnétiques appuyait une couronne circulaire de fer appartenant à une roue dont l'axe était soutenu d'un côté par une articulation sphérique emboîtée dans un palier vertical, de l'autre par une manivelle montée sur l'axe d'un volant et d'une poulie qui portait en même temps un commutateur circulaire à 12 contacts isolés. Ce commutateur au moyen de ressorts frotteurs renvoyait le courant d'un électro-aimant dans le suivant à mesure que la roue de fer tournait autour de la couronne d'électro-aimants, et cette rotation était la conséquence de ce que la roue mobile, en passant d'un électro-aimant à un autre, prenait des positions différentes qui faisaient décrire à son axe, fixe d'un côté, une sorte de trajectoire conique qui faisait tourner circulairement la manivelle à laquelle il était relié.

Le second moteur était constitué par 6 électro-aimants droits disposés respectivement de manière à former les côtés d'un hexagone, sans pourtant que leurs pôles fussent en contact. Le système était disposé verticalement d'une manière fixe, et, parallèlement à lui, pouvait tourner un plateau muni de trois aimants persistants à deux branches, disposés de manière que leurs branches pussent constituer les rayons d'un tourniquet. L'enroulement des hélices des électro-aimants était tellement effectué que les pôles des électro-aimants droits contigus étaient de même nom; de sorte que quand l'un des rayons du tourniquet se présentait devant l'un de ces doubles pôles de manière à être attiré, le rayon suivant, qui était de nom contraire, se trouvait également attiré par le double pôle qui précédait, et il en était de même pour les autres rayons. Ce n'était que quand le tourniquet avait franchi les espaces correspondant aux pôles des électro-aimants

droits, que le courant, se trouvant interrompu, lui permettait de continuer son mouvement en raison de sa vitesse acquise, jusqu'à ce que, étant à portée d'un nouveau couple de pôles d'électro-aimants, le même effet se renouvelât; mais il fallait alors que le commutateur fût inverseur, et c'est pourquoi ce commutateur se composait d'une double roue et de quatre frotteurs.

Moteur de M. Elias. — Le moteur de Elias, de Harlem, construit en 1842, présentait une disposition toute particulière et qui devait plus tard fournir d'excellents résultats avec la transformation que lui firent subir MM. Pacinotti et Gramme. Dans ce moteur, en effet, les organes électro-magnétiques étaient annulaires, et leur réaction tout à fait en dehors des effets jusque-là mis à contribution dans ces sortes de machines. Nous représentons, figure 32, ce moteur qui a figuré à l'Exposition d'électricité de Paris de 1881.

Il se compose, comme on le voit, de deux anneaux concentriques de fer doux, l'un fixe, l'autre mobile. L'anneau intérieur, supporté par les colonnes C, C′, présente six épanouissements, tels que A, A′, le divisant en six parties égales. Entre ces épanouissements est enroulé du fil de cuivre isolé, et l'enroulement est tel, qu'un courant entrant suivant le fil *g* par une extrémité du diamètre horizontal se divise entre les deux moitiés de l'anneau et vient sortir à l'autre extrémité du même diamètre par le fil *g′*. En outre, grâce à des inversions dans le sens des hélices, les pôles A, A′, etc., se trouvent alternativement nord et sud.

L'anneau mobile intérieur est construit de la même manière. Les six pôles qu'il présente sont toujours alternativement nord et sud, et le courant entre suivant les extrémités d'un diamètre par les fils *f*, *f′* qui aboutissent d'autre part, au commutateur qui est en *c*. Ce dernier est composé de six lames de cuivre équidistantes; trois

d'entre elles situées à 120° les unes des autres, communiquent avec le fil *f*; les trois autres sont en relation avec le fil *f'*.

Pour faire marcher le moteur, on peut atteler une pile spéciale sur l'anneau extérieur, et relier à la pile principale les deux bornes B, B', d'où le courant arrive au com-

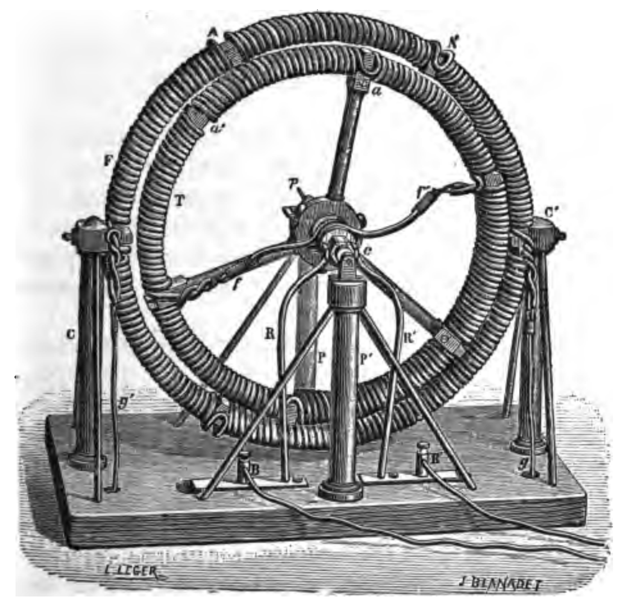


Fig. 32. — Moteur de M. Elias.

mutateur par les ressorts R, R'; ou bien on peut ne se servir que d'une seule pile et relier par exemple B à *g'*, en amenant les fils de pile en B' et *g*. Dans l'un et l'autre cas, les pôles alternativement nord et sud de l'anneau extérieur restent invariables. Les pôles de l'anneau mobile changent au contraire de sens à chaque sixième de tour, et le commutateur est combiné de façon qu'un

quelconque des pôles de l'anneau mobile soit toujours repoussé par un des pôles fixes entre lesquels il se trouve, et attiré par l'autre. Dans la position de la figure, par exemple, si A est nord, *a'* est sud et se trouve attiré par A, tandis qu'il est repoussé par le pôle sud qui se trouve à l'extrémité de la colonne C. Quand *a'* arrive en face de A, le changement de signe a lieu sur tous les pôles mobiles; *a'* devient nord et se trouve alors repoussé par A et attiré par A'. Le même effet se produit pour tous les pôles mobiles, et tous concourent à produire une rotation continue.

Il faut remarquer, en outre, que les solénoïdes qui produisent l'aimantation des différents pôles dans les deux anneaux, sont très rapprochés les uns des autres et qu'il s'exerce entre les solénoïdes fixes et les solénoïdes mobiles des attractions et répulsions de courants parallèles qui concourent à produire la rotation du moteur.

Moteurs de M. Froment. — Le moteur de M. Froment, construit en 1844 et représenté figure 33, a été longtemps un type classique qui a été reproduit par un grand nombre de constructeurs, comme spécimen de moteur électrique, pour les cours de physique. C'était un électromoteur à manivelle dans lequel la force attractive communiquée à l'armature articulée sur l'électro-aimant lui-même se trouvait transformée en mouvement circulaire au moyen d'un double levier articulé agissant sur une bielle, et par suite sur une manivelle adaptée à l'axe d'un volant un peu lourd; une excentrique adaptée à ce même axe, derrière le volant, et que pouvait rencontrer à chaque tour un ressort relié par l'intermédiaire de l'électro-aimant au circuit de la pile, constituait le commutateur, et celui-ci établissant la fermeture du circuit lorsque l'armature se trouvait à son maximum d'écartement de l'électro-aimant, provoquait de la part de celui-ci une impulsion qui faisait tourner le système jusqu'à l'entier

abaissement de l'armature. En ce moment, l'excentrique échappait le ressort de contact, l'électro-aimant devenait inerte, et en raison de la vitesse acquise du volant le mouvement était continué jusqu'à ce que l'armature fût relevée et eût échappé le point mort correspondant à la verticale; on se trouvait donc avoir ainsi un mouvement



Fig. 33. — Moteur à mouvement alternatif, de M. Froment.

circulaire continu comme celui que l'on obtient avec les meules à repasser des émouleurs.

Cet appareil, ainsi que tous les autres moteurs de M. Froment, fait partie des collections du Conservatoire des arts et métiers, grâce à la générosité de son habile successeur et gendre, M. Dumoulin-Froment. La marque du catalogue est P.E. h. 59

Après le moteur précédent, M. Froment en combina un autre en 1845, fondé sur le principe des roues à aubes, et où la force électro-magnétique agit directement sur l'arbre moteur, sans transformation de mouvement. C'est le modèle le plus connu et que l'on trouve le plus souvent dans les cabinets de physique. Nous le représentons figure 34, et son fonctionnement se devine aisément.

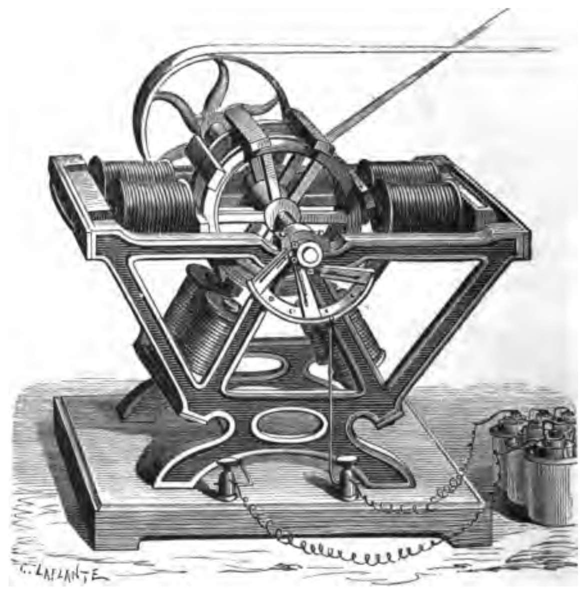


Fig. 34. — Moteur à mouvement de rotation direct, de M. Froment.

Quatre électro-aimants, fixés sur un bâti en fonte, sont disposés suivant le rayon d'une roue qui est ajustée sur l'arbre moteur, et cette roue a sa circonférence munie d'un certain nombre d'armatures de fer doux. Un commutateur composé de ressorts à galets, mis en rapport avec chacun des électro-aimants et placés devant des contacts de pile, est mis successivement en action

par l'intermédiaire de petites cames, sous l'influence de la rotation de l'arbre moteur, et fait passer successivement et alternativement le courant dans les deux couples d'électro-aimants dont l'action sur les armatures est conspirante. Ces armatures, cédant alors à l'attraction électro-magnétique qui agit sur elle, entraînent la roue



Fig. 35. — Moteur épicycloïdal à aimants mobiles, de M. Froment.

sur laquelle elles sont fixées en déterminant un mouvement de rotation continu. Cet électromoteur figure sur le catalogue du Conservatoire avec la marque P.E.h. 61. On l'a appliqué souvent à la manœuvre de petites pompes de cabinets de physique et pour certaines expériences de laboratoire.

Les moteurs combinés par M. Froment, après ceux que nous venons de décrire, et qui datent de 1847, sont les appareils que nous représentons figures 35, 36 et 37. Celui de la figure 35 avait été appelé par lui *électromoteur epicycloïdal* à aimants mobiles; il figure au catalogue du Conservatoire avec la marque P.E. h. 62. Il était constitué par une forte circonférence de bronze verticale garnie intérieurement de douze armatures de fer et au dedans de la-

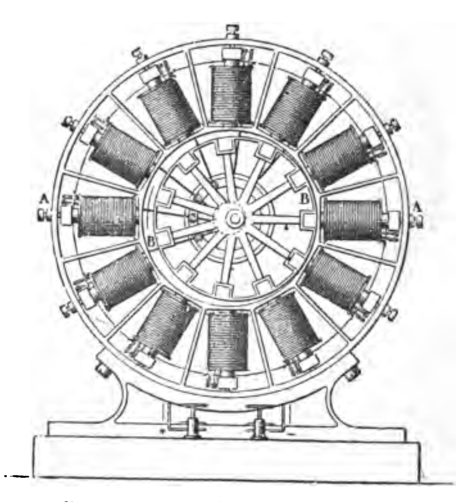


Fig. 36. — Moteur épicycloïdal à aimants fixes, de M. Froment.

quelle se mouvait, en sautant d'une armature à l'autre, une couronne d'électro-aimants à deux branches en nombre égal à celui des armatures et maintenus, suivant le rayon de la couronne, sur une sorte de moyeu emboîté à la manivelle de l'axe moteur. Cet axe pivotait sur deux forts piliers et correspondait à une roue d'engrenage que l'on aperçoit sur notre dessin en arrière de la machine. Un commutateur adapté sur le moyeu de l'appareil, et sur lequel appuyait un frotteur mis successivement en rap-

port avec les différents électro-aimants, les rendait tour à tour actifs et inertes, et il en résultait, entre eux et les armatures de la circonférence de bronze, des attractions successives qui tendaient à faire courir, en tournant, tout le système électro-magnétique tout autour du bord intérieur de cette circonférence. La manivelle de l'axe moteur accomplissait par conséquent un mouvement circulaire agissant à l'extrémité d'un bras de levier dont la longueur correspondait à la différence de diamètre des cercles constitués par les électro-aimants et les armatures.

Malgré son ingéniosité, cette disposition présentait un grand inconvénient qui donna à M. Froment l'idée de renverser les données du problème, et de créer le modèle que nous représentons figure 36. Cet inconvénient était une déformation continuelle, par suite des actions attractives normales, de la circonférence de bronze qui finissait par ne plus être ronde, et empêchait, par cela même, la roue intérieure de tourner régulièrement. D'un autre côté, le poids relativement considérable de la pièce mobile était un inconvénient, et en faisant en sorte que cette pièce portât les armatures alors que la circonférence était munie des électro-aimants, on résolvait le même problème dans des conditions infiniment meilleures, car les électro-aimants pouvaient être fortement emboîtés dans une double cage circulaire AB solidement arc-boutée par eux, et ils pouvaient être disposés en couronne tout autour de la roue portant les armatures. Or, c'est ce même modèle qui avait été combiné par M. Wheatstone dès l'année 1841, et qui fut remis à l'ordre du jour en 1855 par M. Marié Davy.

Pensant que l'effort exercé entre le système fixe et le système mobile, dans son moteur à mouvement direct, pourrait être réparti avantageusement entre les deux systèmes en les mettant tous les deux en mouvement et en combinant ensuite ces deux mouvements en un seul au moyen d'un engrenage, M. Froment construisit en 1848

le moteur que nous représentons figure 37, qui porte la marque P.E. h. 65 au catalogue du Conservatoire, et qu'il a appelé l'*électromoteur triangulaire*. Cette disposition lui a permis de réagir sur trois systèmes de tambours à armatures avec un seul système d'électro-aimants mobiles.

Dans ce système, les électro-aimants au nombre de

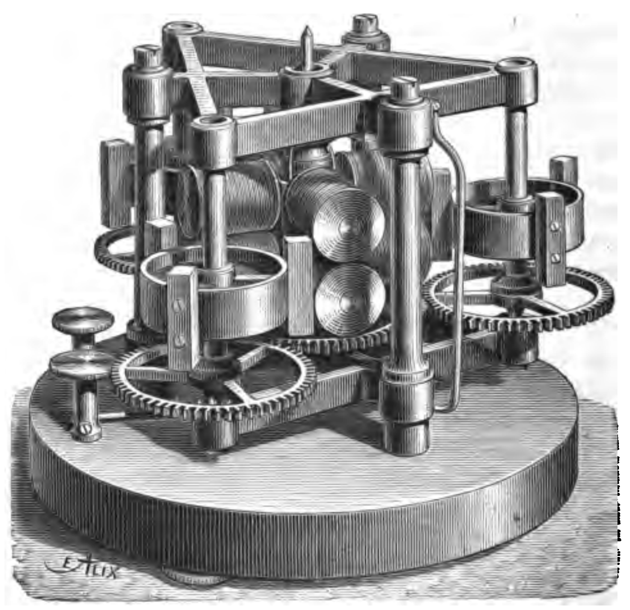


Fig. 37. — Électromoteur triangulaire, de M. Froment.

trois ou de six sont fixés rectangulairement autour d'un axe vertical mobile sur pointes, et tournent au centre du bâti triangulaire aux angles duquel pivotent les axes de trois tambours verticaux munis de trois armatures chacun. Ces axes se terminent inférieurement par des roues dentées qui engrènent avec une roue centrale adaptée à l'axe du système électro-magnétique, et un commu-

tateur analogue à ceux dont nous avons déjà parlé est monté à la partie supérieure de ce dernier axe.

Quand les électro-aimants se trouvent à portée des armatures des tambours mobiles, ces organes s'attirent mutuellement en donnant une impulsion aux systèmes dont ils font partie, et chacun de ces systèmes est mis en mouvement; mais comme de cette impulsion résulte une nouvelle action effectuée par les électro-aimants qui suivent, le mouvement se continue de part et d'autre, et les effets s'additionnent sur l'axe central par l'action combinée des engrenages; de sorte que le commutateur n'a d'autre action à remplir que d'établir le courant à travers les électro-aimants au moment où ils sont près des armatures correspondantes des tambours les plus voisins, et de l'interrompre une fois que les pièces sont arrivées dans le voisinage de leur point de tangence.

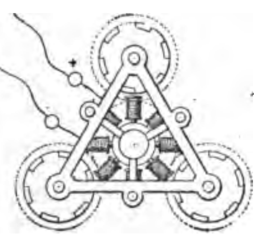


Fig. 38.

La figure 38, qui représente vue en plan une machine de ce genre à six électro-aimants et à six armatures par tambour, peut donner une idée très nette de cette combinaison qui, du reste, n'a pas donné de résultats supérieurs aux autres moteurs du même genre à simple effet.

La même année, en 1848, M. Froment combina encore plusieurs moteurs que nous représentons figures 39 et 40, dont un a été nommé par son auteur *électromoteur à coins* et porte la marque P. E. h. 64 du catalogue du Conservatoire. Dans ce moteur, muni de 4 électro-aimants fixes opposés deux par deux et légèrement inclinés l'un par rapport à l'autre dans le plan horizontal, les armatures ont la forme de coins allongés, et sont maintenues verticalement par des rainures qui leur servent de guide dans les mouvements ascensionnels qu'ils accomplissent.

Ils sont soutenus chacun par une bielle adaptée à une manivelle terminant l'axe moteur, lequel axe est pourvu d'un volant et de pièces excentriques servant de commutateur. Naturellement ces deux coins sont disposés l'un par rapport à l'autre de manière que lorsque l'action de l'un commence, l'action de l'autre cesse, et réciproquement.

Quand l'un des coins est au point supérieur de sa



Fig. 39. — Électromoteur à coins, de M. Froment.

course, les deux faces de sa partie aigüe ont leur maximum d'écartement des pôles magnétiques, et c'est en ce moment que le courant anime les électro-aimants; ceux-ci tendent donc à abaisser ces coins jusqu'à ce que leur partie la plus épaisse soit arrivée sur leur ligne axiale, alors le courant est interrompu dans les électro-aimants précédents et renvoyé par le commutateur dans l'autre système, disposé en ce moment comme l'était celui dont

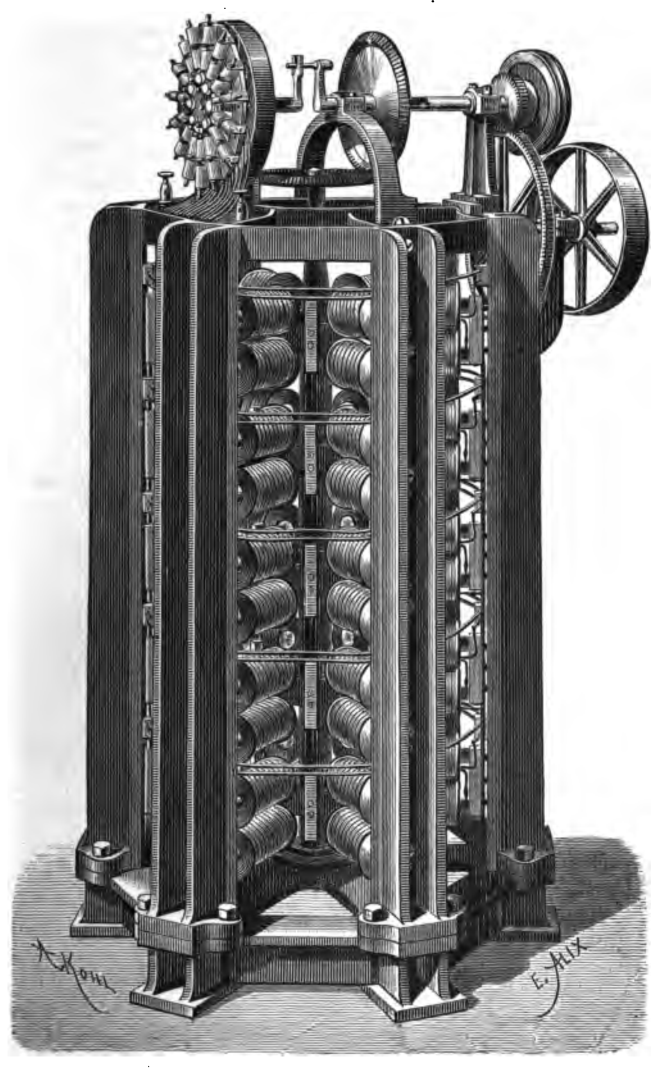


Fig. 40. — Le grand électromoteur de M. Froment.

il vient d'être question, et qui continue son action. Dans ce cas, l'effet attractif est tangentiel et provient à la fois d'une attraction latérale et d'une action directrice; toutefois aucun avantage particulier n'a été produit par ce système.

Enfin nous représentons (fig. 40), le grand moteur à mouvement de rotation directe que M. Froment avait construit pour faire marcher dans ses ateliers ses machines à diviser. Tous les électro-aimants étaient fixés verticalement les uns au-dessous des autres sur six montants en fonte formant les arêtes d'un prisme hexagonal très solidement établi. Au centre de cette espèce de carcasse cylindrique, hérissée d'électro-aimants, se trouvait établi l'arbre moteur portant sur toute sa hauteur une ou plusieurs séries d'armatures verticales placées dans le prolongement les unes des autres et disposées de manière à correspondre à chacune des paires de bobines. Cet arbre se terminait supérieurement par une roue d'angle qui, par l'intermédiaire d'une autre roue d'angle de même diamètre, faisait fonctionner le commutateur que l'on voit à gauche de la figure et un système d'engrenage destiné à diminuer la vitesse du mouvement de la machine, lequel mouvement se trouvait ensuite transmis à ses machines à diviser par l'intermédiaire de la poulie que l'on distingue à droite de la figure.

Le commutateur était constitué par une série de doubles galets rayonnant autour de l'axe moteur et appuyant sur des plaques alternativement isolantes et conductrices mises en rapport avec les divers systèmes d'électro-aimants.

On a prétendu que ce moteur avait la force des $\frac{3}{4}$ d'un cheval-vapeur, mais M. Froment a souvent dit que cette force était bien inférieure à ce chiffre, malgré la transformation qu'il fit subir à ce moteur en 1862.

Tels sont les moteurs de M. Froment qui avaient été regardés longtemps comme les plus perfectionnés et qui

ont coûté beaucoup de temps et d'argent à leur auteur. Toutefois celui-ci ne s'était jamais fait de grandes illusions sur ce genre d'application de l'électricité, et je l'ai souvent entendu désespérer de l'avenir qui lui était réservé. Certainement les combinaisons mécaniques les plus ingénieuses avaient été alors épuisées sur ce genre de machines, mais les effets physiques en jeu n'étaient pas encore parfaitement connus, et ce n'est que dernièrement que la question, en prenant une tout autre direction, a pu faire entrevoir quelques résultats favorables.

Machine de M. Page. — La machine de M. Page, imaginée en 1850, était fondée sur une réaction alors peu connue, l'attraction des solénoïdes qui a fourni depuis plusieurs types de machines importants. Nous avons parlé, page 13, de ces sortes de réactions et de leurs avantages; malheureusement la force développée est peu considérable, et ce n'est qu'avec une grande réserve que l'on doit accepter les résultats annoncés par les journaux de l'époque, résultats qui ont été résumés de la manière suivante, dans le *National intelligencer* des États-Unis.

« Le professeur Page, dans le cours qu'il professe à l'Institut de Smithson, a établi comme indubitable qu'avant peu l'action électro-magnétique aura détrôné la vapeur et sera le moteur adopté. Il a fait, pour soutenir son dire devant son auditoire, les expériences les plus étonnantes. Une immense barre de fer, pesant 160 livres, a été soulevée par l'action électro-magnétique, et s'est mue rapidement de haut en bas, dansant en l'air comme une plume, sans aucun support apparent. La force, agissant sur la barre, a été évaluée à environ 300 livres, bien qu'elle s'exerçât à 10 pouces de distance.

« On ne peut se faire une idée du bruit et de la lumière de l'étincelle électrique lorsqu'on la tire en un certain point de son grand appareil: c'est un véritable coup de

pistolet. A une petite distance de ce point, l'étincelle ne donne aucun bruit.

« Le professeur a ensuite montré sa machine d'une force de 4 à 5 chevaux, qui met en mouvement une pile contenue dans un espace de 3 pieds cubes. C'est une machine à double effet, de 2 pieds de course, et le tout ensemble, machine et pile, pèse environ une tonne (un peu plus de 1000 kilog.). Lorsque l'action motrice lui est communiquée, la machine marche admirablement, donnant 114 coups par minute. Appliquée à une scie circulaire de 16 pouces de diamètre, laquelle débitait en lattes des planches d'un pouce et demi d'épaisseur, elle a donné par minute 80 coups. La force agissant sur ce grand piston dans une course de 2 pieds, a été évaluée à 600 livres quand la machine marchait lentement. Le professeur n'a pu apprécier au juste quelle était la force déployée lorsque la machine marchait avec une vitesse de travail, bien qu'elle fût beaucoup moindre. »

Si ces résultats avaient été parfaitement exacts, il est certain que la machine Page aurait été immédiatement appliquée, et on n'aurait pas cherché dans les autres pays une foule de combinaisons qui ne fournissaient que des effets infiniment moindres. Il y a donc évidemment dans ces indications de grandes exagérations; néanmoins ces résultats ont produit à l'époque une grande sensation dans le monde scientifique et industriel, et ont contribué puissamment à l'élan qui s'est manifesté à cette époque pour les moteurs électriques, élan qui, comme nous l'avons dit, a causé bien des ruines. Quoi qu'il en soit, voici la description de la machine de Page telle qu'elle ressort de son brevet pris en France le 9 septembre 1850 :

« La machine Page était verticale, elle se composait de deux bobines, enroulées chacune avec un fil de 1500 mètres de longueur. Si l'on n'avait fait usage dans chaque cylindre que d'une seule hélice, l'attraction de la

tige de fer n'aurait pas été utilisée sur une grande étendue, puisqu'elle n'aurait été énergique que dans le voisinage de la partie médiane de la bobine, mais M. Page a augmenté le champ de l'attraction en composant ses bobines d'une série d'hélices de petite hauteur, indépendantes les unes des autres et mises en action d'une manière progressive, grâce à un commutateur. Dès lors, la tige de fer était tirée de haut en bas avec un mouvement uniforme. Les deux tiges-pistons étaient deux barres cylindriques de fer doux, longues de 3 pieds et de 6 pouces de diamètre, leur course était de 2 pieds. A l'aide d'un levier et d'une bielle, elles venaient agir sur l'axe d'une roue pour lui imprimer un mouvement de rotation. Cette roue ou volant était du poids de 600 livres. »

Malgré l'assertion du journal américain, le brevet de M. Page n'attribue à ce moteur qu'une force d'un demi-cheval, et, s'il faut en croire M. Armengaud, la pile employée pour faire fonctionner cet appareil était formée de 40 éléments de Grove dont les plaques avaient 25 centimètres de côté. Les essais qui conduisirent à cette machine ne coûtèrent pas moins, d'après M. Figuier, de 800 000 francs qui furent donnés à M. Page par le gouvernement des États-Unis.

Moteur de Hjorth. — Ce moteur, qui a figuré à l'Exposition universelle de Londres de 1851 et qui a été l'objet d'une grande médaille à cette Exposition, avait été breveté en 1849 et paraît n'être qu'une dérivation de l'électromoteur à coins de M. Froment, que nous avons décrit précédemment. Nous verrons que, plus tard, MM. Pellis et Henry ont fondé aussi un électromoteur sur le même principe. Voici comment cet appareil est décrit dans le brevet dont nous avons parlé :

« La figure 41 représente une élévation, la figure 42, une section de la machine. AA est un aimant creux en forme de fer à cheval, conique à l'intérieur, enroulé avec du fil

de cuivre, et suspendu de telle sorte qu'il oscille autour du centre B, muni de supports et de coussinets convenables (*plummer*), comme il est indiqué. A l'intérieur de cet aimant sont fixés un certain nombre d'appendices, coniques de différentes longueurs. La figure laisse voir un autre aimant en fer à cheval CC, conique extérieurement,

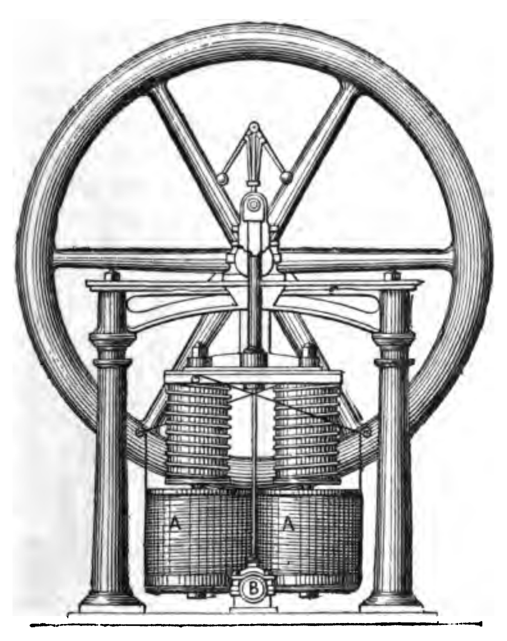


Fig. 41. — Moteur de Hjorth

avec des ouvertures correspondant aux cônes placés dans l'aimant AA. L'aimant CC se meut sur les guides DD reliés au sommet par le support de l'aimant CC, et assujettis au fond de l'aimant AA. Une bielle, attachée à CC, fait mouvoir de la manière ordinaire l'axe d'un volant. Un commutateur O fonctionne de la même façon que le tiroir

d'une machine à vapeur, et est uni de la même façon par une tige partant d'un excentrique. L'action de la machine peut être renversée par l'emploi d'un excentrique qui sert à régler l'arrivée au commutateur d'un courant convenable qui parcourt le circuit suivant : le courant venant du commutateur entre dans le fil de AA et de là

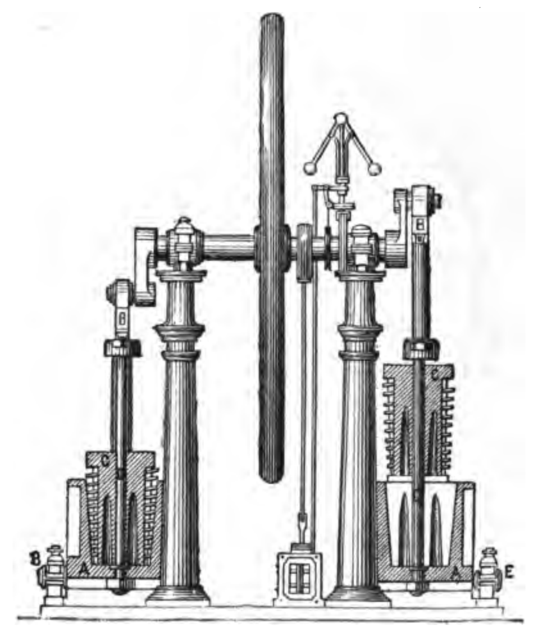


Fig. 42. — Coupe du Moteur de Hjorth.

traverse les fils de CC, puis va à la pile par les fils conducteurs. Aussitôt que le courant passe dans les bobines, elles exercent une attraction mutuelle non seulement de la manière ordinaire, mais parce que les aimants sont formés de telle sorte que la partie intérieure de l'aimant extérieur, aussi bien que la partie extérieure de l'aimant intérieur forment des angles avec la direction du mou-

vement de l'aimant mobile ou actif; et en même temps, les appendices de différentes longueurs se présentant aux pôles des aimants respectifs, une puissance attractive est maintenue pendant toute la course par les parties successives des surfaces qui sont amenées à agir l'une sur l'autre pendant toute la course. A la fin de la course d'une des séries d'aimants, le courant change de sens, et l'autre série d'aimants est rendue active par le passage du courant dans ses fils, comme il a déjà été dit. Afin d'empêcher le courant d'être rompu, et aussi afin de maintenir l'action des aimants, le contact glissant du commutateur est de longueur telle qu'il ne quitte pas la surface conductrice, en communication avec l'une des séries d'aimants, avant qu'il n'ait atteint la surface communiquant avec l'autre série

« Par l'arrangement précédent, on obtient un mouvement alternatif semblable à celui d'une machine à vapeur oscillante, et ce mouvement peut être appliqué suivant le besoin à l'aide de bielles, manivelles, etc. »

Le brevet entre dans beaucoup de détails sur la construction du commutateur et des organes accessoires de cette machine, mais ces pièces n'offrent pas un assez grand intérêt pour que nous nous y arrêtions davantage. On pourra trouver, du reste, tous ces renseignements dans le journal *la Lumière Électrique* du mois de janvier 1883, auquel nous empruntons les figures qui accompagnent cette description.

Moteur de M. Pacinotti. — L'un des plus importants moteurs qui ont été combinés dans la première période de l'invention des moteurs électriques, et en même temps celui qui présentait le plus d'originalité et le plus de nouveauté dans les effets physiques mis en jeu, est celui qu'imagina, en 1861, M. Pacinotti, et qui a été décrit dans *Il Nuovo Cimento* de 1864 de la manière suivante.

« J'ai pris, dit-il, un anneau de fer tourné, pourvu de

16 dents égales. Cet anneau est soutenu par 4 bras ou raies en laiton BB (fig. 43), qui le relient à l'axe de la machine. Entre les dents, de petits prismes triangulaires en bois forment des creux dans lesquels s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie. Cette disposition a pour but d'obtenir, entre les dents de fer de la roue, un isolement parfait des hélices ou bobines électro-dynamiques ainsi formées. Dans toutes ces bobines, le fil est enroulé dans le même sens, et chacune d'elles est formée de 9 spires.

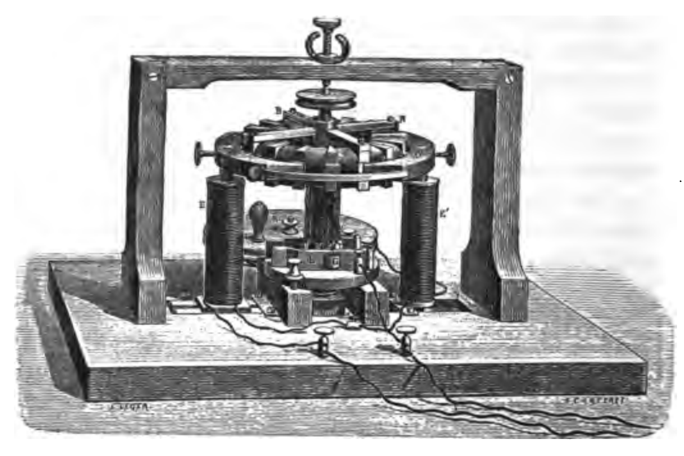


Fig. 43. — Moteur de M. Pacinotti.

Deux bobines consécutives sont séparées l'une de l'autre par une dent de fer de la roue et par le petit prisme triangulaire de bois. En quittant une bobine pour construire la suivante, j'arrête le bout du fil en le fixant au morceau de bois qui sépare les deux bobines.

« Sur l'axe qui porte la roue ainsi construite, j'ai groupé tous les fils dont un bout forme la fin d'une bobine et l'autre le commencement de la bobine suivante, en les faisant passer par des trous pratiqués à cet effet dans un manchon ou collier en bois centré sur le

même axe, et de là en les attachant au commutateur monté également sur l'axe.

« Ce commutateur consiste en une rondelle ou petit cylindre en bois, ayant au bord de sa circonférence deux rangées de mortaises dans lesquelles sont encastrés 16 morceaux de laiton (8 dans les mortaises supérieures, 8 dans les inférieures), les premiers alternant avec les seconds, tous concentriques au cylindre de bois sur lequel ils font légèrement saillie, et dont l'épaisseur sépare une rangée de l'autre.

« Chacun de ces morceaux de laiton est soudé aux deux bouts de fil qui correspondent à deux bobines consécutives; de sorte que toutes les bobines communiquent entre elles, chacune d'elle étant reliée à la suivante par un conducteur dont fait partie un des morceaux de laiton du commutateur. Si donc on met en communication avec les pôles d'une pile deux de ces morceaux de laiton au moyen de deux galets métalliques G, le courant, en se partageant, parcourra l'hélice sur l'un et sur l'autre des points d'où partent les bouts de fil rattachés aux morceaux de laiton qui communiquent avec les galets, et des pôles magnétiques paraîtront dans le fer du cercle sur le diamètre perpendiculaire à AA′. Sur ces pôles agissent les pôles d'un électro-aimant fixe, qui déterminent la rotation de l'électro-aimant transversal autour de son axe, attendu que dans l'électro-aimant transversal, quand il est en mouvement, les pôles se reproduisent toujours dans les positions fixes qui correspondent aux communications avec la pile. »

Cette machine est surtout remarquable en ce qu'elle peut être considérée comme une véritable machine d'induction de Gramme, et M. Pacinotti l'avait si bien compris dès l'origine qu'il l'avait annoncé dans son Mémoire ainsi qu'il suit : « Il me semble, dit-il, que ce qui peut augmenter la valeur de ce modèle, c'est la facilité qu'il offre de pouvoir transformer cette machine électro-

magnétique en *magnéto-électrique à courant continu*. Si au lieu de l'électro-aimant, il y avait un aimant permanent et que l'on fît tourner l'électro-aimant, transversal, on aurait en fait une machine magnéto-électrique qui donnerait un courant induit continu toujours dirigé dans le même sens... Pour faire développer un courant induit par la machine ainsi construite, j'ai approché de la roue magnétique les pôles opposés de deux aimants permanents, ou j'ai magnétisé, à l'aide d'un courant, l'électro-aimant fixe qui s'y trouvait, et j'ai fait tourner sur son axe l'électro-aimant transversal. Tant dans le premier que dans le second cas, j'ai obtenu un courant induit toujours dirigé dans le même sens... On comprend facilement que la seconde méthode n'est pas pratique, mais qu'il est facile de mettre un aimant permanent à la place de l'aimant temporaire ; la machine électro-magnétique qui en résultera aura alors l'avantage de donner des courants induits additionnés et tous dirigés dans le même sens sans nécessiter l'emploi d'organes mécaniques qui les séparent des courants opposés ou qui les fassent concourir tous ensemble. »

M. Pacinotti termine son Mémoire par cette remarque intéressante, qui semble être la première indication de la réversibilité des moteurs électriques. « Ce modèle, dit-il, montre de plus comment la machine électro-magnétique est réciproque de la machine magnéto-électrique, puisque, dans la première, le courant électrique qui a été introduit par les rhéophores, en circulant dans les bobines, permet d'obtenir le mouvement de la roue et son travail mécanique, tandis que dans la seconde on emploie un travail mécanique pour faire tourner la roue et obtenir, par l'effet de l'aimant permanent, un courant qui circule dans les bobines pour se transporter aux rhéophores et de là être amené dans le corps sur lequel il doit agir. »

La machine Pacinotti resta longtemps oubliée dans le cabinet de physique de l'Université de Pise, et ce n'est

que quand la machine Gramme fit son apparition, en 1871, qu'on se rappela celle du savant italien et qu'on la mit publiquement au jour. Elle fut envoyée à l'Exposition de Vienne de 1873, et nous avons tous pu la voir à l'Exposition d'électricité de Paris de 1881, où elle a attiré beaucoup l'attention des techniciens. Nous insistons beaucoup sur cette machine, car c'est avec les machines Gramme qu'on a commencé, en 1873, les expériences de réversibilité qui ont conduit au transport de la force à distance et à tous les résultats intéressants, qui ont fait l'admiration des électriciens dans ces dernières années, résultats que nous étudierons avec soin dans la seconde partie de cet ouvrage.

III. — ANCIENS ÉLECTROMOTEURS

Moteurs fondés sur l'attraction des Solénoïdes, sur l'attraction du fer. — Moteurs à mouvements alternatifs, à mouvement de rotation directe, à mouvements combinés. — Appareils électromobiles — Applications de ces différents moteurs. — Moteurs électro-chimiques.

Dans le chapitre précédent nous avons décrit par ordre de date la disposition des moteurs électriques primitifs, et nous en avons fait ressortir les caractères particuliers. Mais, comme à partir de l'année 1844 les inventions se sont succédé avec une grande rapidité et sont devenues extrêmement nombreuses, nous avons pensé qu'il vallait mieux, pour la clarté de nos descriptions, abandonner l'ordre chronologique et étudier les appareils en les groupant en différentes classes réunissant tous les types fondés sur un même principe. Dans cette croyance nous avons pensé que tous les systèmes combinés jusqu'à l'époque où la question est entrée véritablement dans le domaine de l'industrie, pouvaient être répartis en quatre grandes catégories comprenant :

1° Les électromoteurs fondés sur les réactions dynamiques des courants;

2° Les électromoteurs fondés sur l'attraction du fer par les électro-aimants et sur les réactions des électro-aimants;

3° Les électromoteurs dans lesquels la force de la pesanteur intervient comme source de puissance;

4° Les moteurs électro-chimiques.

I. — ÉLECTROMOTEURS FONDÉS SUR LES RÉACTIONS DYNAMIQUES DES COURANTS.

La roue de Barlow, les tourniquets de Faraday, l'appareil à piles sèches de Zamboni et une foule d'autres instruments de ce genre sont, dans l'acception véritable du mot, autant d'électromoteurs fondés sur les réactions dynamiques des courants, tant magnétiques qu'électriques. Cependant, comme ils ne sont pas capables de produire une force appréciable et que les combinaisons mécaniques n'entrent en rien dans leur construction, nous les distinguerons essentiellement des électromoteurs dont nous allons parler et dont les plus intéressants sont ceux qui sont fondés sur les attractions qu'exercent entre eux les solénoïdes à travers lesquels un courant circule dans un même sens.

Électromoteurs fondés sur l'attraction des solénoïdes. — Dans ces électromoteurs l'un des solénoïdes est constitué par l'hélice d'une bobine magnétisante, l'autre par le courant magnétique qui naît, d'après la théorie d'Ampère, dans un cylindre de fer doux que l'on approche du tube de la bobine. Au moment où celle-ci est traversée par un courant, il se détermine une action attractive, qui tend à faire entrer le cylindre dans le tube jusqu'à ce que ses deux extrémités soient symétriquement

placées par rapport à celles de la bobine. Les lois de ce genre d'attraction ont été données dans le tome II de l'*Exposé des Applications de l'Électricité*, et récemment les effets qui en résultent ont été appliqués par M. Marcel Deprez à un marteau pilon que nous représentons figure 46 et dont nous parlerons plus loin. Sans doute la force développée dans ces conditions n'est pas aussi considérable que celle qui résulte de l'attraction des aimants, mais elle a l'avantage de fournir une course attractive, assez grande, et elle est aujourd'hui souvent appliquée notamment pour les lampes électriques.

Le premier moteur fondé sur ce principe a été, comme nous l'avons déjà vu, construit par M. Page en Amérique, et l'on a prétendu même dans certains journaux américains, notamment dans le *National intelligencer*, qu'il avait une force de cinq chevaux, qu'il marchait sous l'influence d'une pile contenue dans l'espace d'un mètre cube, et qu'il fournissait au piston moteur une course de deux pieds dans toute l'étendue de laquelle agissait une force équivalente à six cents livres. Dans d'autres journaux on prétendait que cette machine faisait marcher les presses d'une imprimerie. Nous avons déjà dit ce que nous pensions de ces allégations. Il est certain que si une pareille machine avait existé, on n'aurait pas exposé en Europe les sommes fabuleuses qui ont été dépensées dans tant de tentatives infructueuses. Toujours est-il que ce moteur a été le point de départ de plusieurs autres, dont un des plus connus est celui de M. Bourbouze que nous représentons figure 44, et qui avait été construit pour les cours de physique de la Sorbonne.

Moteur de M. Bourbouze. — Ce moteur, ainsi qu'on le voit, était disposé comme une machine à vapeur fixe à deux pistons. Aux deux extrémités d'un balancier horizontal se trouvaient suspendus deux cylindres de fer entrant dans deux longues bobines magnétisantes, dont

la partie inférieure était occupée par des bouts de cylindres de fer réunis par une traverse de fer d'une bobine à l'autre et formant ainsi électro-aimant. Au moment où le courant passait dans l'une des hélices, la tige de fer correspondante était attirée par les spires de l'hélice en même temps que par le pôle magnétique placé à sa partie inférieure, et elle s'enfonçait jusqu'à ce que la disparition du courant commandé par le commutateur eût

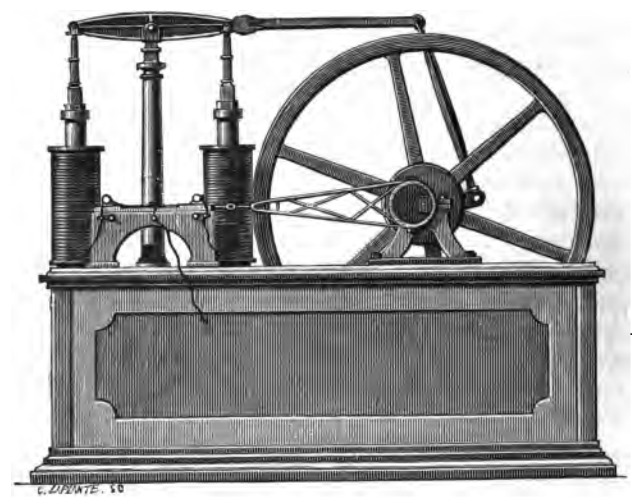


Fig. 44. — Moteur de M. Bourbouze.

annulé la force attractive; comme en cet instant l'autre bobine était animée par le courant, le balancier, en s'inclinant de nouveau pour céder à la nouvelle attraction qui se manifestait, soulevait le premier cylindre de fer et le plaçait dans une position propre à fournir une nouvelle course attractive au moment de la permutation du courant. La transformation du mouvement de va-et vient résultant de cette double action était d'ailleurs effectuée, comme daus les machines à vapeur, au moyen d'une bielle,

d'une manivelle et d'un volant ; et comme on avait besoin d'amplifier la course des tiges de fer, la bielle était adaptée à l'extrémité d'un long levier adapté à l'une des extrémités du balancier. Le commutateur était constitué par une lame frottant alternativement sur deux contacts fixés horizontalement sur une tablette, et était mis en mouvement par un tirant analogue à celui des tiroirs des machines à vapeur qui était conduit par un excentrique.

Moteur de M. du Moncel. — En 1851, l'un de nous fit construire le petit moteur représenté figure 45 dont la

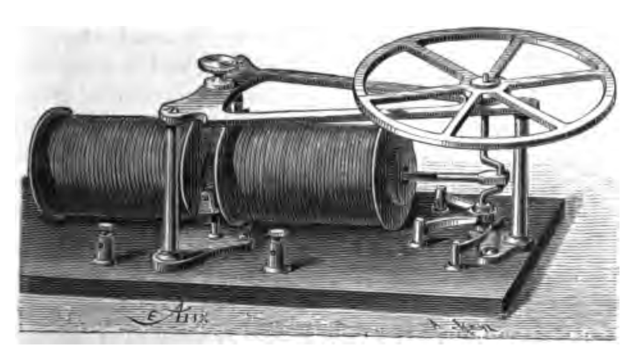


Fig. 45. — Moteur de M. du Moncel.

disposition rappelle les machines à vapeur, à cylindre oscillant. Dans l'origine, le public ne s'expliquait pas facilement la marche de cet appareil, parce que les effets des attractions des solénoïdes n'étaient pas alors bien connus, mais il suffit de considérer la figure 45 pour qu'on s'explique immédiatement les différentes actions qui sont en jeu. Ainsi l'on voit que le cylindre de fer qui, dans la position de la manivelle sur la figure, traverse entièrement la bobine de droite pour s'enfoncer à peine de quelques millimètres dans la bobine de gauche, est sur le point d'être attiré par cette dernière bobine, et,

quand il arrive vers la fin de sa course, il se trouve à portée d'une rondelle de fer terminant la bobine du côté gauche, qui lui donne un surcroît de vitesse capable de faire franchir au volant le point mort correspondant au mouvement en sens inverse de la tige; le commutateur placé sur l'axe du volant, a alors coupé le courant à travers la bobine de gauche et l'a rétabli à travers la bobine de droite, pour faire accomplir au piston un mouvement rétrograde auquel succède un autre mouvement dans l'autre sens, et ainsi de suite.

Pour éviter les frottements, on a dû disposer, dans l'intervalle entre les deux bobines, un galet sur lequel roule le piston de fer, et comme la pièce qui soutient ce galet, ainsi que la pièce de liaison des deux bobines sont suspendues sur des pivots à pointe, la manivelle de l'arbre du volant, articulée directement à une tige fixée à l'extrémité du piston, peut suivre celui-ci dans son mouvement de va-et-vient, en faisant osciller l'ensemble du système à chaque demi-tour accompli par elle.

Dans ce système, le commutateur est composé de deux excentriques fixés sur l'axe du volant et isolés métalliquement l'un de l'autre; un ressort d'argent fixe, en rapport avec l'une des bobines, peut rencontrer à chaque demi-révolution du volant l'un des excentriques, et un troisième ressort assez large pour pouvoir appuyer sur les deux excentriques, amène successivement le courant à ces deux derniers et y provoque les permutations.

Dans un autre système à double effet et à quatre pistons, on a encore tiré un meilleur parti de ces réactions magnétiques, en coupant en deux les pistons, et en réunissant les bouts deux à deux par une rondelle épaisse de cuivre; alors, chaque bobine, au lieu de n'avoir qu'une rondelle de fer doux, en a deux. Il en résulte que les cylindres-pistons, non seulement ne sont plus gênés dans leurs mouvements par leurs réactions magnétiques lorsqu'ils vont d'une bobine à l'autre, mais qu'ils peuvent encore réagir

par leurs deux pôles à la fois sur les rondelles des bobines vers lesquelles ils marchent.

Marteau pilon de M. Marcel Deprez à hélices cloisonnées. — Afin d'accroître encore la course du piston de fer dans les systèmes décrits précédemment, M. Deprez a eu recours au moyen déjà employé par M. Page, c'est-à-dire à un solénoïde, composé d'une série de bobines placées les unes à la suite des autres et à travers lesquelles le courant se trouve distribué successivement au moyen d'un commutateur. Ce sont ces bobines auxquelles il a donné le nom de bobines cloisonnées, et dans ces conditions, le cylindre de fer d'abord attiré par la première bobine, est ensuite attiré par la seconde, puis par la troisième, et ainsi de suite jusqu'à ce que sa course soit entièrement accomplie. On a vu comment M. Page avait établi un moteur d'après ce principe, mais M. Deprez l'a appliqué dans un autre but, et il en a tiré un bon parti dans un marteau-pilon que nous représentons figure 46 et qu'il décrit de la manière suivante.

« Dans l'appareil expérimenté au Conservatoire des Arts-et-Métiers le 15 juin 1882, les sections élémentaires constituant le cylindre électrique AB du marteau, sont au nombre de 80, formant une longueur totale d'un mètre, leurs fils d'entrée et de sortie aboutissent à un collecteur de forme circulaire que l'on voit en FG. Les frotteurs de ce commutateur sont constitués par deux lames CE, CD, fixées à la double manivelle HCI mobile autour du centre fixe C. Elles peuvent faire entre elles un angle quelconque de façon que l'on puisse donner, par tâtonnement, au solénoïde actif la longueur la plus convenable. Quand cet angle a été déterminé, on rend invariable, au moyen d'une vis de pression, l'angle ECD, et l'on manœuvre l'appareil en imprimant à la double manivelle HCI un mouvement circulaire alternatif.

« Le cylindre en fer de l'appareil pèse 23 kilog., mais

lorsque le courant a une intensité de 43 ampères et qu'il traverse 15 sections, l'effort développé peut atteindre 70 kilog., c'est-à-dire trois fois le poids du marteau. Aussi ce dernier obéit-il avec une docilité absolue aux mouvements de la main de l'opérateur.

Déjà, en 1851, l'un de nous avait imaginé une combinaison de ce genre pour faire courir sur une tringle de fer composée de parties alternativement magnétiques et non magnétiques un système de trois bobines juxtaposées, disposées de manière à être sucessivement attirées de proche en proche par les parties magnétiques de la tringle. Nous donnerons plus tard au sujet des appareils électro-mobiles les détails de ce système ainsi que la description d'un autre du même genre combiné bien longtemps après par M. Bonelli; nous signalons seulement ces dispositions dès à présent pour montrer tout le parti qu'on peut tirer de ces sortes de réactions électro-magnétiques dans les applications électriques.

Électromoteur à une seule bobine de M. Siemens. — Ce moteur, d'ailleurs d'une très faible puissance, est fondé sur l'attraction de deux courants électriques, marchant dans le même sens, et sur leur répulsion quand ils marchent en sens contraire. Qu'on suppose dans le moteur représenté figure 45 les deux bobines réunies en une seule et le cylindre en fer doux remplacé par un tube de cuivre dans lequel aura été introduite une hélice métallique suffisamment isolée, et l'on aura une idée assez rapprochée de ce genre de moteur en supposant toutefois le commutateur disposé en inverseur de courant.

Dans ces derniers temps, on a cherché à appliquer aux électro-moteurs, sous une autre forme, les réactions dynamiques des courants, et parmi les appareils les mieux combinés, nous citerons ceux de MM. Deprez, Bürgin et Jablochkoff que nous décrirons du reste dans la seconde partie de ce travail, mais en général leur rendement est



Fig. 46. — Marteau-pilon de MM. Deprez.

assez médiocre, de sorte que ce n'est pas dans ces réactions qu'il faut chercher la solution du problème des moteurs électriques.

II. — ÉLECTROMOTEURS FONDÉS SUR L'ATTRACTION DU FER PAR LES ÉLECTRO-AIMANTS

1° MOTEURS A MOUVEMENTS OSCILLATOIRES ALTERNATIFS.

Dans ces moteurs, la force électro-magnétique résulte de la simple attraction d'armatures articulées au-dessus des pôles d'un ou de plusieurs électro-aimants, lesquelles armatures après avoir subi l'action de ces derniers, se relèvent par suite d'une interruption du courant et sous l'action d'une force antagoniste ou de la vitesse acquise, pour recommencer leur mouvement en sens contraire après une nouvelle fermeture de courant. Il résulte de cette double action un mouvement de va-et-vient qui est ensuite transformé en mouvement circulaire par divers moyens plus ou moins appropriés, qui constituent les différences entre tous les systèmes proposés.

Ces moteurs, dont l'appareil de M. Froment représenté figure 33 offre un des types les plus simples, sont assez nombreux; mais, ne pouvant les décrire tous, nous parlerons seulement de ceux dont on s'est le plus occupé, et en tête de ces machines, nous placerons celle de M. Roux qui, expérimentée en 1855 au Conservatoire des Arts-et-Métiers avec plusieurs autres, a fourni les meilleurs résultats.

Moteur de M. Roux. — La particularité que présentait ce moteur était le moyen employé par son auteur pour amplifier d'une manière simple la course effective des pièces appelées à recevoir les effets de l'attraction et

l'emploi d'électro-aimants tubulaires oblongs, qui constituaient une nouveauté à cette époque. Ce moteur n'avait que deux électro-aimants, mais ils étaient très gros et avaient une force relativement considérable. A portée de ces organes électro-magnétiques, qui étaient disposés horizontalement des deux côtés de l'arbre moteur, se trouvaient suspendues à plat par deux tiges articulées AB, CD (fig. 47), deux grandes plaques de fer doux EF, E'F' auxquelles étaient fixés deux longs leviers FG, F'G', en rapport avec une double manivelle GG' adaptée à l'arbre moteur HI. C'était sur cet arbre que se trouvaient, comme du reste dans tous les autres électromoteurs, l'interrupteur et le volant. Quand le moteur était dans l'inaction,

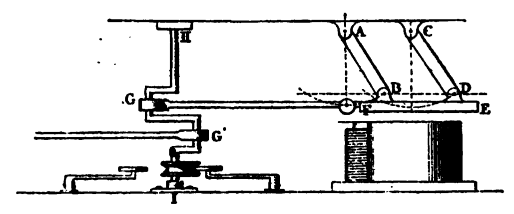


Fig. 47. — Moteur de M. Roux.

l'une des plaques se trouvait soulevée d'environ deux centimètres au-dessus de l'électro-aimant correspondant, tandis que l'autre plaque était complètement abaissée. Aussitôt que le courant passait dans l'appareil, la plaque soulevée se trouvait attirée, mais les tiges qui la soutenaient décrivant pendant ce trajet un arc de cercle, cette plaque se trouvait, tout en accomplissant son mouvement d'abaissement, repoussée de côté. Or c'est cette composante de la force attractive qui était utilisée pour agir sur la manivelle de l'arbre moteur; et comme cette composante représentait le sinus de l'arc alors que la force attractive n'en représentait que la flèche, la course effective de la bielle se trouvait par ce seul fait augmentée dans le rapport du sinus de l'arc à sa flèche. Sans doute,

l'induction magnétique en changeant de place, rendait la force attractive un peu moins grande, mais ce que l'on gagnait dans le plus grand jeu de la bielle était bien supérieur à ce que l'on perdait.

Quand la fonction mécanique de la plaque de fer était terminée, le courant se trouvait dirigé dans le second électro-aimant qui, jusque-là, avait été inerte, et celui-ci, en opérant les mêmes effets que le premier, continuait le mouvement.

Comme on peut en juger par cette simple description, ce moteur n'est autre chose qu'un double système d'électro-aimants, dont les armatures sont munies chacune d'un répartiteur électrique, et cette combinaison était d'autant plus heureuse que l'amplification de la course des bielles FG, F′G′ ne s'opérait qu'à l'avantage de la régularisation de l'action électrique.

Voici les conclusions du rapport de M. Ed. Becquerel à l'égard de cette machine, d'après les expériences faites au Conservatoire en 1855.

« La machine oscillante de M. Roux qui, avec la même surface d'éléments de pile que celle de M. Larmenjeat, a consommé $6^{kil},6$ de zinc par cheval, et par heure, a donné une consommation qui s'est abaissée au tiers, soit $2^{kil},2$ avec des éléments de pile à grandes surfaces; le prix, en zinc seul du cheval serait, d'après ces derniers nombres, de $1^{fr},50$ c. par heure. Il est vrai que M. Roux avait employé pour ses électro-aimants du très gros fil. En tous cas, la dépense portée au minimum de $2^{kil},2$ de zinc par cheval et par heure, soit de $1^{fr},50$ pour une machine qui ne donne pas plus d'un demi-kilogrammètre, est encore trop forte pour qu'on puisse considérer actuellement les électromoteurs comme susceptibles d'application. »

Moteur de MM. Fabre et Kunemann. — MM. Fabre et Kunemann avaient aussi exposé, en 1855, un moteur

d'assez grandes dimensions, auquel ils avaient appliqué leurs électro-aimants tubulaires.

Ces électro-aimants, au nombre de deux, étaient adaptés à l'extrémité de deux tiges verticales reliées par l'intermédiaire de deux bielles aux manivelles de l'arbre moteur ; ils avaient leurs pôles en bas, et étaient articulés par deux goujons sur deux fortes plaques de fer doux qui leur servaient d'armature. Ces plaques étaient maintenues fixes à la partie inférieure de la machine, de sorte que c'étaient les électro-aimants eux-mêmes qui constituaient les pièces électro-magnétiques mobiles. A l'état de repos, un des cylindres électro-aimants devait se trouver dans une position verticale, tandis que l'autre devait être incliné, en faisant charnière sur ses deux goujons. Mais quand le courant venait à animer la machine, et, par conséquent, à circuler à travers ce dernier électro-aimant, la pièce fixe de fer tendait à rappeler celui-ci dans la position verticale, et de ce mouvement résultait une impulsion qui réagissait sur l'arbre moteur. En même temps, le second électro-aimant se trouvait incliné, et le commutateur, en transportant alors le courant sur ce second électro-aimant, provoquait une nouvelle impulsion qui continuait le mouvement de la machine. La disposition de ce système d'électromoteur n'est pas très favorable au développement de la force produite.

Électromoteur de M. Dubos. — Ce moteur, expérimenté au Conservatoire des Arts-et-Métiers en 1857, a fourni un travail de 11,5 kilogrammètres sous l'influence d'une pile de Bunsen de 70 éléments en tension avec une consommation de zinc estimée à $1^{kil},400$ par heure, et le moteur accomplissait 73,35 tours par minute. C'était le résultat le plus important qu'on eût obtenu en France à cette époque.

La machine se composait comme organe moteur d'une sorte de pendule oscillant sur les deux côtés duquel étaient

installées deux séries d'électro-aimants cylindriques, au nombre de 6 de chaque côté. En regard de ces six électro-aimants mobiles, se trouvaient disposés six autres électro-aimants semblables, fixés sur un bâti vertical qu'on pouvait, à l'aide de vis, rapprocher plus ou moins des électro-aimants du pendule. Tous les pôles des électro-aimants mobiles d'un même côté étaient situés dans un même plan, mais lorsque la machine était au repos, ce plan n'était pas vertical, et celui-ci ne se plaçait dans cette position que quand l'axe d'oscillation avait tourné sur la suspension d'une quantité suffisante pour que les électro-aimants mobiles vinssent presque toucher les pôles des électro-aimants fixes. Or il résultait de cette disposition que, dans l'effet attractif produit par l'action réciproque des électro-aimants d'un même coté, l'électro-aimant supérieur mobile se trouvant le plus rapproché de l'électro-aimant fixe correspondant était le plus énergiquement attiré, et en rapprochant par ce fait le système mobile du système fixe, il rendait l'attraction échangée entre les seconds électro-aimants plus énergique; ceux-ci en faisaient autant pour les troisièmes et ainsi de suite jusqu'au sixième. Or, lorsque l'électro-aimant du bas du pendule arrivait jusqu'au contact de son correspondant, le courant se trouvait interrompu par le commutateur à travers les deux séries qui avaient agi, et reporté dans les électro-aimants des deux séries du côté opposé, et ceux-ci, en devenant actifs, entraînaient le pendule en sens contraire pour lui faire accomplir une oscillation rétrograde. On avait donc ainsi un mouvement oscillatoire qui pouvait être transformé en mouvement circulaire par des bielles, manivelles ou autres moyens connus.

La machine de M. Dubos pouvait fonctionner de trois manières : 1° sous l'influence seule des électro-aimants fixes, et alors les électro-aimants mobiles agissaient comme de simples armatures sans être animés par aucun courant; 2° sous l'influence des attractions réci-

proques des électro-aimants des deux systèmes dont les pôles étaient alors disposés de manière à fournir des actions conspirantes dans un même sens; alors le courant se bifurquait entre les deux systèmes d'électro-aimants d'un même côté, de manière à faire naître des pôles de noms contraires les uns en face des autres; 3° sous l'influence des attractions et répulsions combinées, et alors un courant permanent était lancé à travers les électro-aimants mobiles, et un second courant traversant les électro-aimants fixes était alternativement renversé d'un système à l'autre. C'est le second de ces modes d'action qui a produit les meilleurs résultats. La disposition du commutateur dans ces différents cas n'avait du reste rien de particulier et peut du reste se deviner aisément.

Moteur de M. Gaiffe. — Nous représentons (fig. 48), un petit moteur de M. Gaiffe à mouvements alternatifs

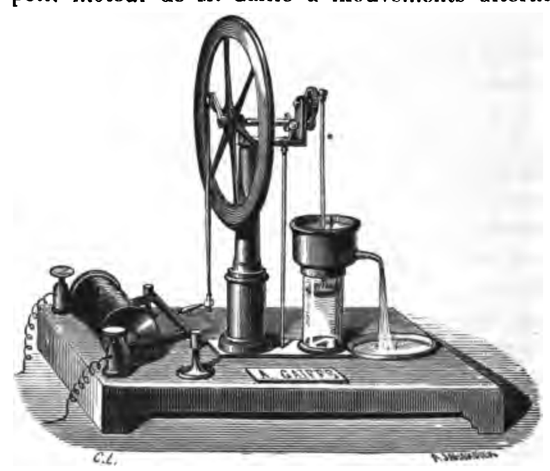


Fig. 48. — Moteur de M. Gaiffe.

qui a été utilisé à faire mouvoir une petite pompe. C'est un petit appareil de démonstration très simple et inté-

ressant à montrer dans les cours. Dans cet appareil l'électro-aimant est droit et réagit cependant par ses deux pôles, comme dans certains moteurs exposés en 1855 par M. Dezelu, par suite de la forme de son armature qui est doublement coudée; l'action électro-magnétique produite est à la fois attractive et directrice et se rapporte aux systèmes dont nous avons parlé page 12.

Moteur de M. Gérard de Liège. — Ce système n'est autre chose que l'application aux électromoteurs de la disposition électro-magnétique que le même inventeur avait appliquée aux horloges. Cette disposition consiste dans un électro-aimant droit dont les extrémités polaires se prolongent et se recourbent de manière à se présenter l'une devant l'autre et à constituer une sorte d'O allongé, interrompu par une fente de 1 à 2 millimètres. Considérée d'après son mode d'action, cette disposition revient à celle d'un électro-aimant dont les pôles seraient munis de semelles de fer très rapprochées l'une de l'autre et réagissant sur l'armature par les parties voisines de l'extrémité de ces semelles. L'électromoteur est d'ailleurs constitué par deux électro-aimants du genre de celui dont nous venons de parler, qui se trouvent fixés horizontalement sur un bâti métallique dans deux plans différents, déterminant entre eux un angle de 30°. Une armature de fer doux constituée par un anneau de fer allongé de même force et de mêmes dimensions que les électro-aimants, se trouve interposée entre leurs extrémités polaires et est disposée de manière à osciller suivant son petit axe de figure. Cette armature est d'autre part articulée à une bielle adaptée à la manivelle de l'axe du moteur, de manière que le mouvement d'oscillation qu'elle peut accomplir soit transformé en mouvement circulaire. Enfin un commutateur adapté à cet axe moteur, du côté opposé au volant, permet de dis-

tribuer alternativement le courant dans les deux électro-aimants. Grâce à l'inclinaison en sens inverse de ceux-ci, il n'existe pas de point mort dans le jeu de l'appareil, et l'impulsion produite résulte de l'attraction exercée par les deux pôles de chaque électro-aimant, attraction qui se manifeste quand le plan de l'armature se présente angulairement par rapport à celui de l'un ou de l'autre des électro-aimants, et qui se continue jusqu'à ce que les deux plans coïncident. Comme cette coïncidence ne peut exister que pour un seul des électro-aimants à la fois, et qu'elle a pour effet de placer l'armature angulairement par rapport à l'autre, la commutation du courant qui a lieu alors, a pour effet de provoquer des attractions successives de sens inverse, qui entretiennent le mouvement du moteur.

Moteur de M. Gautier. — Ce système a été combiné pour obtenir que les électro-aimants, tout en agissant à une très petite distance sur leurs armatures, puissent fournir néanmoins une course suffisante pour faire fonctionner énergiquement le moteur. Il emploie à cet effet une série de systèmes de doubles électro-aimants rangés par couples les uns à côté des autres, et ayant action, couple par couple, sur des roues à rochet adaptées à l'axe de rotation du moteur. Les électro-aimants de chaque système sont placés l'un devant l'autre par rapport à la roue à rochet sur laquelle ils doivent avoir action, et leur armature est portée par un cadre articulé qui réagit par son extrémité sur la roue à rochet au moyen d'un cliquet. Ces armatures sont disposées librement dans deux entailles pratiquées sur les côtés de ce cadre, et peuvent par conséquent être soulevées, si le cadre, continuant son mouvement de descente, un obstacle rigide se présente devant elles. Or, c'est précisément cette disposition qui réalise le problème que s'était posé M. Gautier. Il résulte en effet de la position

des deux électro-aimants l'un devant l'autre et de l'articulation du cadre portant les armatures, que, si la première de celle-ci est à 2 millimètres, je suppose, de l'électro-aimant correspondant, l'autre armature pourra être à une distance double; et si des ressorts commutateurs sont disposés convenablement par rapport aux dents du rochet, on pourra faire en sorte que, dans le premier moment, le courant anime le premier électro-aimant, et n'arrive au second que lorsque l'armature de celui-ci se trouvera assez abaissée, par suite de l'inflexion du cadre provoquée par la première armature, pour réagir d'une manière utile et doubler l'angle de chute de ce cadre, ce qui pourra déterminer l'échappement d'une dent du rochet correspondant. Si on suppose maintenant qu'après cette action accomplie, le système électro-magnétique voisin réagisse de la même manière, on pourra comprendre que le mouvement se trouvera continué, et de plus, que le premier rochet pourra, au moyen d'un encliquetage, relever le cadre abaissé du premier système, et le remettre en position convenable pour recommencer son action, du moins quand les commutateurs lui auront envoyé le courant. On peut, comme on le comprend aisément, multiplier indéfiniment ces systèmes électro-magnétiques, mais M. Gautier estime que trois suffisent pour fournir des effets mécaniques bien définis. Pour détruire les effets du magnétisme rémanent, M. Gautier dispose une seconde pile et des commutateurs convenables pour lancer un faible courant de sens contraire à travers les électro-aimants qui ont accompli leur action attractive.

Électromoteur de M. Roussilhe. — Pour vaincre la grande difficulté du peu de course fournie aux pièces mobiles qui subissent les effets de l'attraction électro-magnétique, M. Roussilhe adapte à l'une de ces pièces, qui sera, je suppose, une traverse horizontale, une série

de tiges de longueur progressivement décroissante et mobiles à l'intérieur des trous à travers lesquels elles passent. Ces tiges portent d'un côté une armature de fer doux, de l'autre une tête qui les soutient lorsque la traverse horizontale est soulevée ; de sorte que, dans cette position, toutes les armatures sont disposées entre elles comme les marches d'un escalier. Au-dessous de cette série d'armatures, se trouve une série d'électro-aimants interposés chacun dans une dérivation particulière du courant issue de la source électrique elle-même, « de manière, dit M. Roussilhe, que la pile puisse donner à chacun d'eux la même force que s'il eût agi isolément ». Avec cette disposition, l'armature la plus basse se trouvant dans la sphère d'attraction de l'électro-aimant qui lui correspond, la tige qui la supporte provoque un abaissement de la traverse, égal à la distance qui sépare l'armature de l'électro-aimant (3 millimètres, je suppose) ; mais de cet abaissement résulte le rapprochement de la seconde armature qui, en agissant dès lors comme la première, abaisse de nouveau la traverse, refoule la tige de la première armature à travers le trou qui lui sert de gaine, et reporte la troisième armature dans la sphère d'attraction du troisième électro-aimant. Ces mêmes effets se reproduisant pour toute la série des électro-aimants, il en résulte que le mouvement de la traverse, qui n'était dans l'origine que de 3 millimètres, se trouve porté, pour 100 électro-aimants, à 30 centimètres, distance qui est plus que suffisante pour obtenir un mouvement de va-et-vient à peu près égal à celui du piston dans les petites machines à vapeur ordinaires.

Pour obtenir une plus grande force sous un moindre volume, M. Roussilhe dispose les électro-aimants précédents sur plusieurs lignes circulaires concentriques, ce qui entraîne pour chaque série d'électro-aimants occupant chaque circonférence, une traverse circulaire munie de

ses tiges à armatures. Mais comme l'attraction devant se répartir également autour de l'axe central qui commande le mouvement de la machine aurait exigé que les tiges à armatures fussent de même longueur pour chaque traverse circulaire, et ne pussent décroître que suivant le rayon commun de ces traverses, l'inventeur a préféré faire de ces traverses elles-mêmes des armatures annulaires soutenues chacune par quatre tiges, lesquelles pouvaient dès lors être adaptées à une croix rigide soutenue par la bielle du moteur. Ces tiges décroissant de la circonférence au centre de cet ensemble d'anneaux concentriques, il arrive que, quand le système est soulevé, ces anneaux forment, les uns par rapport aux autres, une espèce de figure conique qui surmonte le groupe des électro-aimants, et qui peut être repliée comme une spirale en limaçon. Au moment de l'attraction initiale, c'est donc le premier anneau qui se trouve attiré, puis le second, le troisième, etc., jusqu'à ce qu'ils se trouvent tous appliqués dans le même plan sur les électro-aimants. Or, de cette succession d'attractions résulte une course considérable de la croix à laquelle est fixée la bielle, et, par suite, un mouvement communiqué au balancier de la machine que supporte cette bielle. Ce mouvement étant produit de la même manière de l'autre côté de ce même balancier, par l'adjonction d'un second système électro-magnétique analogue à celui que nous venons de décrire, et qui fonctionne alternativement avec celui-ci, il en résulte un mouvement de va-et-vient qui peut être transformé en mouvement circulaire, comme celui des machines à vapeur établies dans le même système.

Électromoteur de MM. Pellis et Henry. — On a beaucoup parlé à une certaine époque de ce moteur, dans lequel l'amplification du jeu des pièces, mises en action sous l'influence électro-magnétique, était obtenue au

moyen de cornets en fer doux adaptés aux armatures des électro-aimants, et de pôles magnétiques coniques. Nous représentons figure 49 cette disposition dont nous avons déjà parlé page 37; mais outre que ce système d'amplification n'était pas nouveau, puisqu'il avait été combiné

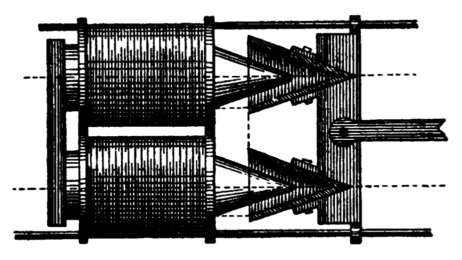


Fig. 49.

dès l'année 1849 par M. Hjorth, il ne présentait pas encore d'avantages bien marqués, à cause de la décomposition de la force attractive qui a lieu dans ce cas, et du déplacement continu des polarités surexcitées. Cet appareil, pas plus que les autres, n'avait donc résolu la question des électromoteurs.

Moteur de M. de Sars. — Ce système est une modification de celui de M. Roux avec une combinaison électro-magnétique qui, suivant l'auteur, évite les inconvénients du magnétisme rémanent. Cette combinaison magnétique consiste dans un électro-aimant à deux branches d'assez grandes dimensions, dont les bobines agissent séparément, sous l'influence du commutateur, ce qui fait que l'électro-aimant ne fonctionne jamais que comme un électro-aimant boiteux. Entre les branches de cet électro-aimant, est articulée sur la culasse une pièce de fer qui joue le rôle d'un troisième noyau magnétique, et qui porte à son extrémité libre, et également articulées, deux armatures de fer doux soutenues au-dessus des deux pôles magné-

tiques, du côté opposé à leur articulation, par deux bielles : ces bielles maintiennent le mouvement des armatures à peu près parallèle à lui-même quand l'attraction magnétique, s'exerçant normalement sur elles, les force à se déplacer latéralement. Les bobines de l'électro-aimant sont d'ailleurs enroulées de manière à fournir deux pôles de même nom, et la pièce de fer intermédiaire qui soutient les armatures se termine par un levier qui réagit sur la manivelle du moteur et le commutateur. Celui-ci est à mercure et disposé de manière que le courant traverse alternativement les bobines après chaque inclinaison à gauche ou à droite de la branche intermédiaire. Or il résulte de cette disposition que, bien que l'électro-aimant n'agisse que sous l'influence d'une seule bobine à la fois, la force attractive développée sur l'armature résulte d'une réaction produite par deux polarités magnétiques contraires ; car la branche oscillante et les deux armatures qui s'y trouvent articulées sont polarisées ainsi que la culasse elle-même d'une manière opposée au pôle actif de la bobine. Il se produit donc, comme dans le système de M. Roux, une attraction normale qui force l'armature à se déplacer de côté et à incliner la pièce oscillante qui la porte en sens contraire de sa position initiale ; d'où il résulte sur la manivelle du moteur et sur le commutateur une action qui se traduit par le renvoi du courant dans la seconde bobine. Mais comme le pôle développé sur cette bobine est de même nom que sur l'autre bobine, la culasse et le noyau magnétique de la première bobine se trouvent polarisés en sens contraire de ce pôle, aussi bien que la branche oscillante qui ne change pas de polarité, et la polarité contraire que possédait le noyau magnétique de la première bobine se trouve, par cela même, avoir son magnétisme rémanent complètement détruit, au moment même où il pourrait exercer une action nuisible sur le relèvement de l'armature primitivement attirée.

2° MOTEURS A MOUVEMENT DE ROTATION DIRECTE

Dans ce genre de moteurs dont on peut se faire une idée simple par le modèle de M. Froment, que nous avons représenté figure 34, les armatures sont généralement disposées autour de la circonférence d'une roue ou d'un cylindre, et reçoivent successivement l'action d'électro-aimants rangés circulairement en dehors de cette roue, lesquels exercent par conséquent le même effet que l'eau d'une chute tombant dans les augets d'une roue hydraulique. Parmi les anciens modèles, nous distinguerons ceux de MM. Larmenjeat, Camacho, Cance, Trouvé, Cazal, etc. Celui de Larmenjeat, toutefois, présente une disposition particulière, qui le fait sortir un peu des électromoteurs à mouvement de rotation directe ordinaires, et à ce titre nous nous y arrêterons un peu longuement. C'est d'ailleurs celui qui, avec l'électromoteur de M. Roux, a été le plus remarqué à l'Exposition de 1855, et les expériences faites au Conservatoire ont conduit MM. Ed. Becquerel et Tresca aux conclusions suivantes:

« Des quatre machines soumises à l'expérience deux seulement, celle de M. Larmenjeat et celle de M. Roux, ont donné des résultats susceptibles de fournir des déductions intéressantes.

« La machine rotative de M. Larmenjeat a donné comme minimum de dépense $4^{kil},5$ de zinc de consommation par cheval de force et par heure. Si l'on ne fait attention qu'au prix de revient du zinc, supposé de $0^{fr},70$ le kilog., et qu'on néglige même le prix des acides employés, celui de l'usure des couples, etc., on trouve que cette consommation correspondrait encore à $3^{fr},15$ par cheval et par heure. »

On voit par cette conclusion à quels petits résultats on était parvenu en 1855.

Électromoteur de M. Larmenjeat. — M. Larmenjeat a appliqué d'une manière très intelligente à son électromoteur le système d'électro-aimants circulaires à trois pôles, de M. Nicklès, que nous avons représenté figure 12. Dans cette machine, représentée figure 50, les armatures et les électro-aimants sont mobiles. Les armatures M,M,M, sont formées par six cylindres de fer doux qui peuvent tourner sur leur axe à l'aide des tourillons *t t*. Ces cylindres sont placés symétriquement autour des électro-aimants circulaires qui sont au nombre de trois et fixés les uns à la suite des autres sur un même axe de rotation A. Un seul de ces électro-aimants F est représenté

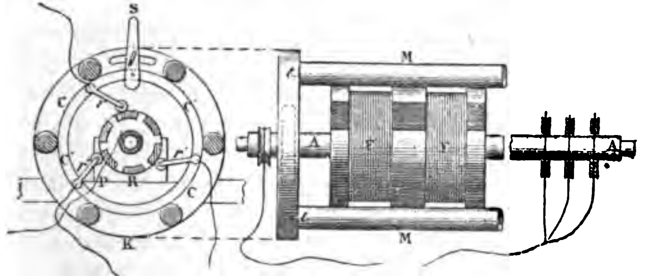


Fig. 50. — Électromoteur de M. Larmenjeat.

sur la figure. Ils sont, comme on le voit, composés chacun de trois disques de fer taillés sur leur circonférence de manière à présenter six points de contact en fer et six parties en cuivre, remplissant les intervalles jusqu'à une profondeur d'environ un centimètre. Ces parties de cuivre ont une étendue double des parties de fer, et la rondelle du milieu, conformément aux recherches de M. Nicklès, a une épaisseur double des rondelles extrêmes.

Les trois électro-aimants, présentant ensemble une longueur d'environ un mètre, sont disposés, par rapport aux divisions de leurs disques, de telle manière que les surfaces de contact en fer de chacun d'eux ne soient pas sur

une même ligne droite, afin que l'action magnétique, échangée entre les cylindres de fer doux et les parties de fer qui représentent les pôles de ces électro-aimants circulaires, se manifeste en des points différents de l'arc correspondant aux parties de cuivre.

Le commutateur que nous avons représenté en K, à gauche de la figure, se compose d'une partie mobile avec l'axe, qui constitue la roue R, et d'une partie fixe, représentée par les cercles CC et C′C′. La roue R est formée de six parties métalliques. Le cercle C′C′ concentrique à CC qui porte les armatures, soutient les galets r, r', r'', qui appuient continuellement sur la roue R pendant sa rotation.

Les galets r, r', r'', sont chacun en rapport avec un des électro-aimants circulaires, et le courant est conduit aux plaques conductrices de la roue R, par un frotteur P.

Pour bien régler la position des galets r, r', r'', par rapport aux parties conductrices de la roue R, un petit levier S a été adapté au cercle C′C′, et ce levier, portant une vis de pression mobile dans une rainure pratiquée dans le cercle CC, permet d'avancer ou de reculer plus ou moins le système des trois galets et même de le déplacer suffisamment pour changer complètement le sens de rotation de la machine. Il devient donc facile, avec ce système de commutateur, de régler convenablement l'introduction du courant dans les trois électro-aimants, et de les faire réagir successivement.

Il sera maintenant facile de comprendre la marche de l'appareil : quand les armatures MM se trouveront à distance convenable pour l'attraction des parties de fer de l'électro-aimant E, le courant circulera à travers cet électro-aimant, et les six attractions échangées entre ces parties de fer et les six armatures auront pour effet de faire tourner l'électro-aimant et par suite l'arbre A d'un tiers de l'arc correspondant à l'intervalle de séparation entre les parties de fer. Mais ce mouvement a reporté les par-

ties de fer du second électro-aimant à distance convenable des armatures MM, d'où il résulte un nouveau mouvement qui en provoque de la même manière un troisième de la part du dernier électro-aimant. Alors revient le tour de l'électro-aimant E, et les réactions précédentes se renouvellent indéfiniment tant que le courant circule à travers le commutateur K.

M. Larmenjeat aurait pu rendre fixes les armatures MM; mais en les faisant roulantes il n'a pas eu à craindre leur flexion et a pu réagir de plus près sur les disques des électro-aimants. Ce système est, comme on peut en juger, extrêmement simple, et a fourni des résultats relativement bons surtout sous le rapport de la vitesse de rotation produite.

Électromoteur de M. Cazal. — Ce moteur, exposé en 1867 et qui a été disposé pour être adapté aux machines à coudre, a pour organe essentiel une bobine électro magnétique ou un électro-aimant à pôles multiples et de grande surface, formé de fonte brute et de tôle découpée, pour que son prix de revient soit aussi bas que possible. Le moteur, qui peut être fixe ou mobile, comprend à la fois une bobine et une armature, s'attirant l'une l'autre, et se mettant en mouvement quand elles sont rendues actives par le passage du courant. Tantôt c'est la bobine qui tourne à l'intérieur de l'armature alors annulaire; tantôt c'est l'armature de forme cylindrique qui tourne autour de la bobine rendue fixe. Toutes deux, armature et bobine, portent à leur circonférence des échancrures que l'on remplit d'une matière isolante du magnétisme, de telle sorte qu'à chaque passage du courant une moitié de leur surface seulement soit aimantée, l'autre moitié restant à l'état neutre ou inerte. Un commutateur, portant aussi à sa surface autant de parties conductrices qu'il y a de divisions à la circonférence de la bobine et de l'armature, fait les fonctions de distributeur du courant. Le mouve-

ment de rotation du moteur peut se produire à volonté de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant la position que l'on donne au distributeur, ou la direction dans laquelle on le fait fonctionner. Mais une fois déterminé, le mouvement de rotation s'effectue toujours dans le même sens, ce qui est indispensable pour les machines à coudre. Il paraît que la machine à coudre à laquelle il était adapté, à l'Exposition de 1867, fonctionnait avec le courant d'une pile de Bunsen de 4 éléments.

Moteur de M. Camacho. — Le modèle auquel M. Camacho semble avoir donné la préférence est celui que nous avons représenté figure 50. Seulement les électro-aimants qu'il a adoptés, et qui sont au nombre de quatre, sont les électro-aimants à noyaux tubulaires multiples que nous avons décrits page 15, et qu'il a fait carrés pour agir plus régulièrement; les armatures, de leur côté, sont composées d'un grand nombre de lames de fer isolées magnétiquement les unes des autres au moyen de lames de carton. Ces armatures, dont nous avons fait ressortir page 16 les avantages, sont d'assez grande largeur et se trouvent en conséquence un peu arquées. Leur emploi dans ce système d'électro-moteur est d'autant mieux justifié que l'électro-aimant, en raison de la multiplication de ses noyaux tubulaires, peut agir sur elles plus longtemps par attraction latérale, puisque chaque noyau peut exercer son effet attractif individuellement sur des armatures distinctes et que, en raison de la forme carrée de ces noyaux, les côtés qui font face aux armatures exercent leur effet parallèlement aux lames composant ces dernières. Le commutateur de cet appareil présente lui-même une disposition excellente, en ce qu'il permet de modifier à volonté les durées relatives des fermetures et des interruptions du courant. Il est muni à cet effet de lames de contact taillées en biais. Avec deux frotteurs disposés sur des vis de rappel, les contacts

peuvent être effectués plus ou moins près de la partie la plus étroite de ces lames, et conséquemment déterminer des frottements plus ou moins longs. Avec des électro moteurs du genre de celui dont nous parlons, il est difficile, à priori, de savoir quand doivent commencer et finir les fermetures du courant; or, cette disposition permet facilement, par quelques expériences préalables, de disposer le commutateur dans les meilleures conditions possibles. Ces appareils, comme nous l'avons déjà dit, ont fourni d'assez bons résultats; ils ont pu faire marcher des machines à coudre et des pianos mécaniques d'une manière satisfaisante à l'Exposition des Champs-Élysées de 1875.

Afin d'éviter l'emploi des piles de Bunsen qui sont si dispendieuses et si désagréables par les émanations qui en résultent, M. Camacho avait employé des piles à bichromate de potasse à deux liquides et à écoulement continu.

Moteur de M. Chutaux. — Le système de M. Chutaux, sauf les électro-aimants qui sont ordinaires, ressemble assez à celui de M. Camacho. Comme lui, il a employé des armatures multiples; seulement les lames de fer qui les composent, au lieu d'être isolées magnétiquement au moyen de lames de carton, sont isolées par un étamage préventif des lames, et cet étamage est assez épais pour obtenir une isolation suffisante. En raison de la similitude des deux moteurs, il est résulté un procès entre les deux inventeurs, qui a montré que, si M. Camacho avait eu la première idée de l'application des armatures multiples aux moteurs, M. Chutaux l'avait le premier brevetée. Du reste il paraîtrait que M. Froment lui-même avait construit des armatures de ce genre, qu'on a retrouvées au milieu d'une foule d'organes électriques de toutes espèces qu'il avait abandonnés avant sa mort.

Le commutateur du moteur de M. Chutaux n'a rien qui le distingue des autres, si ce n'est deux vis de rappel

adaptées aux frotteurs et qui permettent de déplacer les points de frottement à mesure que les étincelles les détériorent. Ce système du reste avait déjà été employé dans d'autres appareils. Les essais qu'on a faits de l'électromoteur de M. Chutaux à l'Exposition de 1875 ont été également assez satisfaisants, et il paraît, d'après plusieurs lettres de M. Debain, qu'il aurait également fait fonctionner des pianos mécaniques.

Moteur de M. Cance. — M. Cance met à contribution dans son moteur les électro-aimants à noyaux multiples que nous avons décrits page 15. Ces électro-aimants sont seulement au nombre de deux, et disposés l'un à la suite de l'autre sur une même ligne horizontale. Les armatures, au nombre de cinq, sont disposées sur les rayons d'une espèce d'étoile dont le centre est traversé par l'arbre moteur, lequel, par cette disposition, est forcément vertical. Cet arbre traverse le bâti de l'appareil entre les deux électro-aimants, et le noyau servant de moyeu aux rayons de l'étoile, qui doivent être en bois ou en bronze, a une disposition telle que, quand les armatures arrivent dans le voisinage de la ligne axiale des électro-aimants, leurs faces latérales se trouvent coïncider avec cette ligne. Il résulte de cette disposition que, lorsqu'une armature se présente devant l'un des électro-aimants, elle se trouve d'abord attirée par la branche de cet électro-aimant la plus rapprochée de l'arbre, et comme cette attraction est effectuée successivement par les différents noyaux magnétiques de cette branche, elle se trouve bientôt placée à portée de l'autre branche, qui réagit alors sur elle avec ses divers noyaux comme la première, jusqu'à ce que sa face latérale antérieure ait atteint la ligne axiale de l'électro-aimant. Alors le courant se trouve interrompu, et comme avec ces sortes d'électro-aimants le magnétisme rémanent est très amoindri, le moteur continue sa course jusqu'à ce que le second électro-aimant, placé du

côté opposé, ait commencé de la même manière son action attractive, ce qui a lieu du reste presque instantanément, en raison de la multiplicité des armatures. Par cette disposition, chaque électro-aimant réagit comme s'il représentait par le fait deux électro-aimants placés l'un à côté de l'autre et, comme avec les électro-aimants

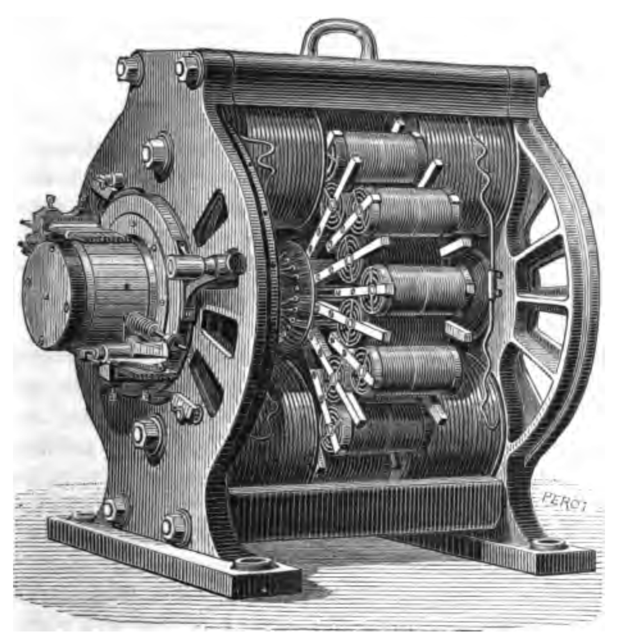


Fig. 51. — Machine de M. Cance.

à noyaux multiples le champ de l'attraction est très étendu, puisqu'il est en rapport avec le nombre des noyaux, on peut obtenir de cette manière, avec un seul électro-aimant, une course attractive considérable qui atteint près de 10 centimètres dans le modèle construit par M. Cance.

Ce modèle avec dix éléments de Bunsen, moyen modèle, a pu fournir une force suffisante pour faire marcher un tour et permettre de tourner un morceau de bois de 10 centimètres de diamètre.

M. Cance a, du reste, dans ces derniers temps perfectionné ce moteur et combiné dans ce système une machine d'induction intéressante qui a figuré à l'Exposition d'électricité de 1881 et que nous représentons figure 51. Naturellement cette machine comme les autres est reversible.

Moteur de M. de Sars. — Ce système est fondé sur le même principe, quant à la disposition du système électro-magnétique, que celui du même auteur que nous avons décrit précédemment. Comme dans celui-ci, en effet, le magnétisme rémanent des électro-aimants inactifs est à peu près supprimé au moment où il pourrait exercer une action fâcheuse.

Ce système se compose essentiellement d'une couronne d'électro-aimants tubulaires, légèrement elliptiques, sur lesquels roulent, portés par un croisillon en fer, des galets cylindro-coniques également en fer, dont le nombre est moindre que celui des électro-aimants, afin qu'ils soient tous, à un moment quelconque, dans une position différente par rapport aux électro-aimants. De cette manière, ces galets, qui servent d'armatures aux électro-aimants, ne restent jamais inactifs; il y en a toujours au moins deux qui subissent les effets de l'attraction. De plus, comme ces galets roulent sur les enveloppes de fer des électro-aimants qui sont toujours polarisées de la même manière, car les pôles développés sont toujours de même nom, le système entier des armatures, y compris le croisillon qui les soutient, partage la polarité de ces enveloppes et communique aux noyaux portant les hélices magnétisantes, quand le courant ne les traverse plus, une polarité inverse à celle que leur avait donnée

ce courant, laquelle polarité détruit comme nous l'avons dit leur magnétisme rémanent.

Le commutateur est placé sur l'axe du croisillon qui porte les galets et les poulies de transmission de mouvement; il ne présente rien de particulier; c'est un cylindre de bois sur lequel est adapté un balai de fils métalliques qui tourne autour d'une série de contacts en rapport avec les différents électro-aimants.

On comprend aisément qu'en disposant la couronne d'électro-aimants dont il a été question précédemment de manière à opposer par leur fond ou leur culasse deux électro-aimants tubulaires semblables, et qu'en plaçant d'un côté et de l'autre de la double couronne d'électro-aimants ainsi formée deux croisillons munis de galets de fer, disposés comme il a été dit plus haut, on pourrait avoir un moteur à double effet qui doublerait l'action exercée.

Nous ajouterons encore que les galets cylindro-coniques, adoptés par M. de Sars, sont creux afin de fournir moins de force d'inertie magnétique et mécanique.

Moteurs de M. Trouvé. — M. Trouvé a combiné à une certaine époque un certain nombre de modèles d'électro-moteurs dont plusieurs sont aujourd'hui assez répandus dans le commerce, sous une forme ou sous une autre, pour faire tourner certains appareils de physique et notamment les tubes de Geisseler.

Le type le plus simple de ces moteurs consiste dans une bague de fer pourvue intérieurement de deux renflements en forme de dents de rochet, et à l'intérieur de laquelle pivote un système électro magnétique composé de deux électro-aimants droits placés dans le prolongement l'un de l'autre. Un courant étant lancé à travers le fil de ces deux électro-aimants au moment où ils approchent des parties renflées de la bague, et se trouvant ensuite interrompu au moment où ils dépassent la sommité

de ce renflement, l'appareil continue sa marche, absolument comme si les deux renflements constituaient des armatures séparées.

En rendant mobile la bague de fer elle-même, on peut obtenir deux mouvements de sens contraire, l'un provenant de l'action, l'autre de la réaction, et qui peuvent démontrer cette loi de la mécanique que la réaction est égale à l'action. En maintenant fixe le système électro-magnétique, la bague tourne seule avec une vitesse qui peut être estimée par le nombre de tours qu'elle accomplit en une minute. Or, en arrêtant cette bague et laissant libre le système électro-magnétique, celui-ci tourne avec une vitesse qu'on reconnaît être la même que celle de la bague, si les deux masses sont égales en inertie.

Les autres électromoteurs de M. Trouvé se rapprochent de ceux que nous avons décrits page 59 et 60. Dans l'un, le système électro-magnétique est constitué par un grand nombre d'électro aimants, et il forme en quelque sorte une roue magnétique qui, comme dans le moteur de MM. Wheatstone et Froment, est soutenue par son centre à la manivelle du moteur, et roule à l'intérieur d'un anneau de fer doux sous l'influence de fermetures et d'interruptions de courant, faites à propos à travers les différents électro-aimants. Ces fermetures et interruptions de courant sont effectuées par un commutateur ingénieux dont nous devons dire quelques mots, car il est d'une simplicité extrême. Il consiste dans un disque isolant à travers lequel passent tous les bouts des fils des électro-aimants, lesquels bouts s'y trouvent rangés circulairement; ces bouts étant reliés mécaniquement en un point de la manivelle du moteur, le disque peut décrire un mouvement gyratoire conique. Au-dessous de ce disque isolant, se trouve un autre disque de platine soutenu par un ressort à boudin, et qui se trouve toujours en contact avec l'un ou l'autre des fils du premier disque, quelle que soit la position de celui-ci. Or, il ré-

sulte de cette disposition que, si le disque de platine et les électro-aimants sont mis en rapport avec la pile, le disque d'ivoire, sous l'influence du mouvement du système magnétique, mettra successivement les bouts du fil des électro-aimants en contact avec les différents points de la surface du disque de platine, et les électro-aimants se trouveront ainsi animés successivement.

Dans un autre modèle, l'action électro magnétique s'effectue normalement sur les armatures, et c'est une longue bielle adaptée à celles-ci qui, en réagissant sur une manivelle, met en marche le moteur. Toutefois l'action électro magnétique ne s'exerce pas sur ces armatures dans les conditions ordinaires; ces armatures ne sont pas en effet articulées à une pièce voisine des électro-aimants, elles ne sont maintenues que par un goujon enfoncé librement dans une pièce rigide placée entre les deux pôles magnétiques, et chaque électro-aimant n'agit sur elles que sous l'influence d'une bobine, c'est-à-dire à la façon des électro-aimants boiteux. Il arrive alors que, sous l'influence du mouvement de la bielle, ces armatures se trouvent soulevées, tantôt au-dessus du pôle nord des électro-aimants, tantôt au-dessus des pôles sud, et fonctionnent comme si elles étaient actionnées par deux électro-aimants distincts. Ordinairement M. Trouvé n'adapte à ces moteurs que deux systèmes magnétiques de ce genre, mais il dispose le système moteur et les bielles de manière à pouvoir être déplacées à volonté, par rapport aux électro-aimants qui restent fixes, et il peut de cette manière trouver les conditions de longueur de bielles les plus favorables pour fournir le maximum d'effet. Nous verrons plus loin que M. Trouvé a combiné un autre système d'électromoteur susceptible d'être appliqué au gyroscope.

Électr omoteur de M. Allan.— On a fait beaucoup de tapage, il y a quelque vingt ans, au sujet de cet électro-

moteur, qui n'a pas eu du reste un meilleur sort que les autres. Bien que les effets produits par lui dans les expériences faites en 1857 au Conservatoire n'aient eu rien de bien satisfaisant (26 kilogrammes de consommation de zinc par cheval et par heure!!), nous croyons devoir, en historien fidèle, en dire quelques mots, et voici du reste la description qu'en faisait à cette époque le *Cosmos*.

« La machine de M. Allan est construite sur un principe tout à fait nouveau. Une chaîne, sorte de câble sans fin, est armée, suivant sa longueur, de séries d'armatures ou morceaux de fer doux; les électro-aimants sont distribués en séries sur un cylindre; ils attirent les armatures de la chaîne, et font avancer, par pas successifs, et toujours dans le même sens, la chaîne sans fin qui communique le mouvement au moteur quelconque qu'il s'agit de faire fonctionner. On amène d'abord la première série d'armatures de la chaîne à une distance assez petite de la première série d'électro-aimants pour que l'attraction puisse s'exercer, puis on fait passer le courant; les électro-aimants deviennent actifs; la chaîne avance, sa progression amène une nouvelle série d'armatures en présence d'une nouvelle série d'électro-aimants qui deviennent actifs au moment où la première série est devenue inerte par la cessation du courant qui les animait;le mouvement continue par conséquent dans le même sens, et il continue incessamment tant que la pile est en action. Au lieu d'une chaîne sans fin, M. Allan emploie quelquefois une simple barre à laquelle les électro-aimants impriment un mouvement de va-et-vient que l'on transforme par les moyens connus en mouvement continu et de même sens. »

Est-ce ce même M. Allan qui, à peu près à la même époque, combina un électromoteur dans lequel on faisait tourner une armature allongée du genre Siemens entre les pôles d'un fort aimant fixe? On trouve dans les

brevets américains à ce nom la mention d'un appareil de ce genre.

Électromoteurs de M. Pulvermacher. — M. Pulvermacher a aussi combiné un système de moteur à mouvement de rotation direct dans lequel il a employé les plaques électro-aimants, que nous avons représentées page 10, figure 15 et, pour empêcher le développement des courants induits et la production de l'étincelle au commutateur, il lui a appliqué un système de commutateur à charbon dans lequel le courant ne se trouvait interrompu que graduellement, ce qui le constituait à l'état de courant ondulatoire. Il prétend que cet appareil a bien marché; reste à savoir la force qu'il a pu développer.

Électromoteur de M. Marié Davy. — « Cet électromoteur, dit M. Becquerel dans un rapport fait à l'Académie en 1858, se compose de soixante-trois électro-aimants disposés à égale distance autour d'un cercle de bois garni intérieurement d'un cercle de cuivre; tous les électro-aimants ont leur axe dirigé vers le centre de la roue, et leur surface coïncide avec la surface concave du cercle de cuivre. Dans l'intérieur de cette grande roue, il s'en trouve deux autres dont le rayon est le tiers de celui de la première, et qui sont garnies intérieurement d'un cercle de cuivre; ces roues portent chacune vingt et un électro-aimants équidistants, qui sont dirigés vers leur centre réciproque, et dont les surfaces polaires coïncident avec les surfaces concaves des roues de cuivre. Les petites roues peuvent donc rouler sans glissement dans l'intérieur de la grande roue, et entraîner dans leur mouvement l'arbre de la machine, qui coïncide avec l'axe de la grande roue. Les électro-aimants mobiles viennent se mettre successivement en contact avec les électro-aimants fixes. Les

grandes et les petites roues sont munies d'un engrenage destiné à maintenir la coïncidence une fois établie.

« La machine est pourvue de pièces destinées à mettre successivement chacun des électro-aimants en communication avec la pile, et à donner une aimantation différente aux deux électro-aimants en présence, à l'instant où ils agissent l'un sur l'autre.

« M. Marié a également remplacé les roues intérieures garnies d'électro-aimants par d'autres qui sont munies seulement d'armatures de fer doux; la partie mobile est ainsi plus légère et les engrenages deviennent inutiles. Les roues de fer doux roulent donc comme des galets sur la surface intérieure de la roue enveloppante, de façon à venir successivement en contact avec les électro-aimants au moment de leur aimantation. »

Quoique la machine de M. Marié Davy n'ait été qu'une dérivation de celle de M. Froment, une somme de 2000 francs a été accordée à son auteur pour faire des expériences en grand. Nous n'avons pas entendu dire que ces essais aient abouti, et on peut douter qu'ils aient produit des résultats plus avantageux que ceux dont nous avons parlé précédemment. Toujours est-il que, si le moteur de M. Marié Davy ne présente rien de nouveau dans ses combinaisons électro mécaniques, le Mémoire qu'il a présenté à ce sujet renferme des considérations sur les électromoteurs qui ont leur intérêt, et c'est sans doute ce mémoire qu'on a voulu récompenser. Parmi les conclusions de ce Mémoire, il en est une que je crois intéressant de rappeler ici, et nous allons l'extraire du rapport même fait à l'Académie :

« M. Marié Davy a pensé, et avec raison, que pour obtenir le maximum d'effet dans les machines électro-magnétiques, il fallait que les électro-aimants et les armatures pussent agir jusqu'au contact, attendu que la force électro-magnétique, comme il l'a prouvé par le calcul et l'expérience, décroît si rapidement avec la

distance, qu'en employant deux électro-aimants, lorsque ceux-ci approchent de l'infini jusqu'au contact, ils développent une quantité de travail telle que les cinq sixièmes le sont dans le dernier millimètre, et moitié du reste dans l'avant-dernier. En remplaçant le deuxième électro-aimant par une armature de fer doux, les trois quarts de la quantité de travail sont produits dans le dernier millimètre de parcours de l'armature et plus de la moitié du reste dans l'avant-dernier. Or, dans la plupart des machines électro-magnétiques rotatives construites jusqu'à présent, les armatures mobiles passent rapidement devant les électro-aimants fixes suivant une ligne perpendiculaire à l'axe, sans arriver jusqu'au contact. Ainsi on n'utilise pas toute la quantité de travail que l'on pourrait obtenir. »

Moteur de M. le comte de Molin. — M. le comte de Molin est de ceux qui ont persévéré le plus longtemps dans la croyance à la réussite des électromoteurs, et, par le fait, il y est toujours resté ; car la mort est venue le surprendre au milieu de ses recherches et au moment où il était parvenu à faire marcher, avec sa machine, sur l'un des lacs du bois de Boulogne, une petite barque chargée de quatorze personnes. Il est vrai que les expériences faites au Conservatoire des Arts et métiers sur la puissance de cette machine avaient montré qu'elle ne développait pas une force supérieure au septième de celle d'un homme; mais, sur l'assurance qui lui fut donnée que, pour faire marcher sa barque chargée de quatorze personnes, il fallait deux bons rameurs, il a cru le problème en partie résolu, et il s'est éteint dans cette persuasion. On peut voir dans le journal *les Mondes* (t. VIII, p. 161; t. X, p. 332 et 590; t. XI, p. 417 et t. XII, p. 391) les différents essais qu'il entreprit pendant les années 1865 et 1866, essais qui ont eu à ces époques un certain retentissement. Voici la description que

M. de Molin fait de son appareil dans un Mémoire envoyé en octobre 1866 à l'Académie des sciences :

« On connaît, dit-il, l'énergie des attractions électro-magnétiques, et je me suis souvent demandé pourquoi les moteurs basés sur ce principe produisaient si peu d'effet, un huitième d'homme pour trente grands éléments Bunsen ; et toujours je l'ai attribué au magnétisme rémanent.

« J'ai donc pensé que ce genre de moteurs devait fonctionner à petite vitesse, pour donner au fluide le temps de s'accumuler et de disparaître, et qu'il fallait faire réagir jusqu'au contact les puissances d'action, en évitant le choc toutefois, et en produisant le mouvement circulaire direct.

« Voici les dispositions que j'ai adoptées : sur deux plans parallèles, j'ai disposé en cercle, concentriquement à un même axe, deux rangées d'électro-aimants, savoir seize sur chaque plan. Sur le même axe, entre les deux plans, j'ai disposé une roue en bronze avec un arbre fixé dans son noyau, mais ne tournant pas et pouvant osciller dans tous les sens autour de son centre immobile. Pour céla, elle pivote dans un anneau concentrique pivotant lui-même, les deux axes d'oscillation étant perpendiculaires entre eux. Si le courant est lancé dans les électro-aimants, la zone médiane sera attirée en sens inverse par deux pôles diamétralement opposés, qui viendront s'appuyer contre l'aimant correspondant et, si l'on neutralise successivement de chaque côté les électro-aimants placés en arrière, la roue se portera de même et sans secousse sur le barreau qui suit, et cela successivement sur tout son pourtour, et l'arbre aura décrit un cône dans l'espace.

« La plus grande distance entre la zone et l'armature est de trente-quatre millimètres, et la plus petite d'un demi-millimètre, hormis le contact ; la roue a quatre-vingt-quinze centimètres de diamètre. Il y a toujours seize électro-aimants en exercice, huit à chaque pôle. J'ai pu,

en serrant progressivement le frein, ramener la vitesse de vingt à trois tours par minute, sans diminuer le travail disponible, ce qui m'a paru une précieuse qualité dans un moteur, et j'en ai conclu que le travail, dans les limites d'une certaine vitesse, est proportionnel à la quantité d'électricité produite. J'ai de plus appliqué cet appareil, avec vingt éléments Bunsen, à la propulsion d'un bateau-omnibus du lac du bois de Boulogne, par le moyen de roues à aubes, avec une charge de quatorze personnes et vent debout ; les mariniers ont estimé ce travail à celui de deux rameurs. »

Cette description n'étant pas très claire, nous croyons devoir rapporter ici celle qu'en donne M. l'abbé Moigno dans le tome XI des *Mondes*, page 417.

« Ce moteur simple et massif, dit-il, est une roue verticale en bronze, armée sur chacun de ses flancs de seize armatures qui cèdent tour à tour à l'attraction de deux séries de seize électro-aimants fixés sur deux cercles parallèles à la roue, et placés verticalement l'un à droite, l'autre à gauche. La roue métallique ne tourne pas ; elle oscille seulement autour de son centre, de telle sorte que chacune des armatures arrive successivement au contact d'un électro-aimant après s'en être rapprochée successivement, entraînée par l'attraction magnétique qui est la force motrice du système. Si l'on considère un groupe de ces armatures successives, la première, la plus éloignée, sera à un millimètre et demi de l'électro-aimant correspondant, la seconde à un millimètre, la troisième à un demi-millimètre, la quatrième au contact. Aussitôt le contact arrivé, le courant qui rendait l'électro-aimant actif est interrompu ; cet électro-aimant correspondant devient inerte ; l'armature bientôt débarrassée du magnétisme rémanent se détache, et s'éloigne pour revenir de nouveau au contact quand son tour sera venu.

« Le bon fonctionnement de l'appareil dépend du jeu régulier du commutateur dont les contacts, mis à l'abri

de la destruction par les étincelles de rupture du courant, doivent rester parfaitement nets. Pour que cette dernière condition, la plus délicate de toutes, soit remplie, le commutateur fonctionne au sein d'une auge remplie d'eau et dans laquelle on fait dissoudre un peu de potasse qu'on renouvelle en la faisant écouler par un robinet quand elle est trop sale. Le courant qui anime le moteur est fourni par une pile de Bunsen de 20 éléments.

« La force vive engendrée dans la roue par l'exercice de l'attraction est reçue par un arbre qui, à l'aide de deux chaînes de Vaucanson, fait tourner les deux roues à aubes du bateau. »

D'après cette description, on peut croire que le moteur en question est du genre de ceux de MM. Wheatstone, Froment et Marié Davy que nous avons décrits précédemment page 60.

Les expériences faites, en 1865, au Conservatoire des Arts et métiers, avec cette machine, ont conduit aux conclusions suivantes :

« 1° Le plus grand travail développé par la machine en une seconde doit être évalué à 1,112 kilogrammètres, c'est-à-dire en estimant le travail de l'homme 8 kilogrammètres, elle peut fournir environ la septième partie d'un travail d'homme.

« 2° La consommation la plus favorable s'élève à 17 kilogrammes de zinc par force de cheval et par heure. »

Ces résultats sont, comme on le voit, bien peu satisfaisants, et pourtant, on s'est beaucoup occupé à une certaine époque de cette machine.

Électromoteur de M. Ed. Becquerel. — Ce système, qui a précédé celui de M. Larmenjeat que nous avons décrit page 10, est fondé sur le même principe que ce dernier ; seulement, n'étant pas destiné à produire une grande force, il n'est muni que d'un électro-aimant circulaire au lieu de trois, et encore cet électro-aimant n'a que deux

pôles ou deux rondelles. Dans ce système, les cylindres de fer doux servant d'armatures, sont remplacés par des électro-aimants fixés à l'intérieur d'une circonférence de fer comme ceux du moteur de M. Froment, représenté figure 36. La réaction électrique est du reste exactement la même que dans le moteur de M. Larmenjeat, seulement, le commutateur a dû être compliqué en raison de la double action qu'il avait à produire.

M. Becquerel, à l'aide de cet appareil, a pu démontrer la vérité du raisonnement que nous avons exposé relativement aux effets contraires des courants induits. Ainsi, il a reconnu que le maximum de vitesse du moteur était obtenu quand l'électro-aimant circulaire était à l'état naturel et quand les extrémités du fil entourant cet électro-aimant n'étaient pas jointes ensemble, ce qui, comme on le comprend facilement, empêchait le courant d'induction de se développer.

III. ÉLECTROMOTEURS DANS LESQUELS LA PESANTEUR INTERVIENT COMME SOURCE DE PUISSANCE.

Bien des chercheurs de mouvement perpétuel se sont creusé la tête pour obtenir, par des allongements et raccourcissements de bras de levier, la destruction d'équilibre d'une roue munie de contrepoids. Malgré toutes leurs combinaisons, il fallait toujours en venir à réagir d'une manière quelconque soit sur ces poids, soit sur les leviers qui les soutenaient. Ce problème, tant caressé par certains mécaniciens, a été repris dernièrement par plusieurs personnes, en faisant intervenir, comme agent auxiliaire, l'électricité. Les unes ont voulu employer l'électricité à remonter les poids dont la chute avait provoqué la rotation du moteur; les autres, peut-être avec plus de raison, ont cherché simplement à faire réagir l'électricité pour modifier les conditions de longueur des bras de levier supportant ces poids moteurs. Parmi les

moteurs de ce genre, je vais en décrire un type combiné il y a quelque vingt ans.

Imaginons, fixés sur un axe horizontal mobile M (fig. 52), de forts rayons équidistants de forme rectangulaire et construits en matière non magnétique; concevons que, sur ces rayons, puissent glisser librement, dans le sens de leur longueur, de fortes gaines ou étuis de cuivre terminés à leur extrémité libre par un fort tourillon servant de pivot à une roue très pesante de fer

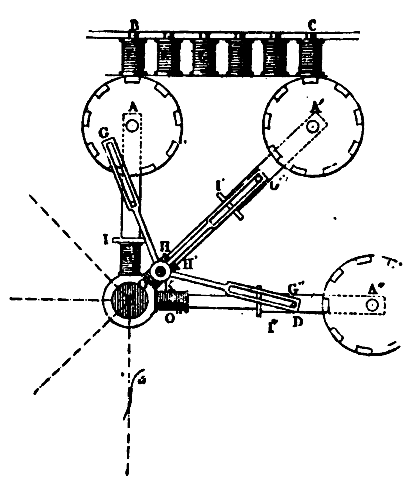


Fig. 52. — Électromoteur à effets de pesanteur.

A, A′, A″, etc.; enfin, supposons qu'à partir du point B soient disposés sur une ligne droite BC une série d'électro-aimants E,E′, E″, etc., rangés les uns à côté des autres. On concevra facilement que, si les roues A, A′, A″, ont leur circonférence taillée comme les disques de fer des électro-aimants circulaires du moteur de M. Larmenjeat, c'est-à-dire composées alternativement de parties de cuivre et de parties de fer, elles pourront par l'intermédiaire d'un commutateur renvoyant succes-

sivement le courant d'un électro-aimant à l'autre, être entraînées du point B au point C, en faisant glisser leur support sur les rayons de l'arbre M, et être ensuite abandonnées à elles-même à partir du point C. Le poids de ces roues étant alors inégalement réparti des deux côtés du système moteur, par suite de l'inégale longueur des leviers auxquels ces poids sont appliqués, ce système sera mis en mouvement; mais pour que ce mouvement continue, il faut que ces bras de levier, sur lesquels réagissent par leurs poids les roues A, A′, A″, etc., se raccourcissent immédiatement après leur chute de C en D.

Pour cela les gaines ou glissières de cuivre, servant de support aux roues A, A′, sont munies de fortes chevilles sur lesquelles sont articulées des bielles GH, G′H′, etc., pivotant sur un même tourillon fixe placé latéralement et excentriquement en K à côté de la roue. Ces bielles portent en G une petite rainure dont nous verrons à l'instant l'utilité; enfin, ces mêmes glissières de cuivre sont munies à leur partie inférieure d'une forte pièce de fer I, I′, servant d'armature à des électro-aimants O, O′, O″, etc., fixés sur les rayons de l'arbre moteur.

Avec cette disposition, on concevra facilement que les bielles GH, G′H′, ayant leur centre de mouvement en dehors de l'arbre moteur et du côté C, ne tendront pas à raccourcir les bras de levier MA, MA′, etc., tant que ceux-ci seront développés du côté C; mais quand ils se trouveront reportés du côté opposé, ces bielles tireront à elles les glissières des roues A, A′, etc., et par cela même raccourciront ces bras de levier. Au moment où ce raccourcissement sera complètement effectué, le commutateur dirigera un courant à travers les électro-aimants O,O′ O″, qui se trouveront alors en contact avec les armatures I, I′, I″; alors les bras de levier MA, MA′, etc., se trouveront maintenus à leur minimum de longueur, jusqu'à ce que les roues A, A′ soient arrivées successivement devant l'électro-aimant E. En ce moment seulement, le

commutateur rompt le courant à travers les électro-aimants O, O′, pour le reporter dans les électro-aimants E, E′, E″, etc., qui rallongent de nouveau les bras de levier MA, MA′, etc. C'est pour permettre aux bielles GH, G′H′ de se développer, lorsque les rayons MA, MA′ s'approchent des électro-aimants E, E′, etc., qu'une rainure a été adaptée à l'articulation des bielles GH, G′ H′ avec les glissières des roues A, A′, etc. Inutile de dire que toutes les réactions dont nous venons de parler sont successives et se répètent pour chacune des roues A, A′, A″. Il en résulte que, quand une de ces roues ne réagit plus pour faire tourner le moteur, il s'en trouve toujours derrière elles deux autres qui exercent leur action.

IV. APPAREILS ÉLECTRO-MOBILES.

Dès l'année 1851, l'un de nous avait eu l'idée de faire courir sur une tringle composée de parties alternativement magnétiques et non magnétiques un système de bobines, disposé de manière à être successivement attiré de proche en proche par les parties magnétiques de la tringle. A cet effet, ces bobines, qui étaient au nombre de trois, étaient soutenues par un système de galets, pour faciliter leur glissement, et portaient un commutateur qui ne fermait le courant à travers l'une ou l'autre d'entre elles, que quand l'action attractive des hélices sur les tronçons magnétiques pouvait être effectuée efficacement. La description de cet appareil a été publiée dans la première édition d'une brochure sur les électromoteurs, qui a paru en 1852, et l'appareil a été exécuté chez MM. Breton frères; mais les résultats en ont été si peu satisfaisants, que l'auteur n'a plus parlé de cette invention dans ses autres publications. Néanmoins, cette idée a été reprise en 1864 par M. Bonelli dans le but de réaliser le transport d'objets pondérables au moyen de l'électricité, but qui du reste avait été également celui de

l'inventeur primitif quand il imagina le système précédent. Pour obtenir ce résultat, M. Bonelli établissait entre le point de départ et celui de la destination un tube cylindrique divisé en sections et pourvu de multiplicateurs électriques sur toute la longueur de son parcours. En dedans de ce tube, une hélice de fils métalliques de moindre diamètre que la partie creuse du tube devait recevoir une impulsion progressive par l'attraction électrodynamique que le tube électrisé par sections devait exercer sur les spires de 'hélice mobile parcourue par le même courant.

Depuis ces systèmes, plusieurs inventeurs, entre autres MM. Militzer, Bellet et Rouvre, Gaiffe, etc., ont cherché à résoudre le même problème en en disposant les éléments de manière à constituer un véritable chemin de fer ayant pour partie mobile une véritable locomotive électro-magnétique. Nous n'allons décrire, en ce moment, que les divers systèmes qui ont été proposés, dans cet ordre d'idées, jusqu'à l'époque de la découverte de la réversibilité des machines d'induction, nous réservant de décrire dans la seconde partie de ce livre ceux beaucoup plus sérieux combinés par MM. Siémens, M. Deprez, etc.

Locomotive électro-magnétique de M. Militzer. — Voici la description que donne de cet appareil M. le comte Marschall dans le compte rendu qu'il a fait, pour le journal *les Mondes* du 31 mai 1866, de l'une des séances de 1865 de l'Académie des sciences de Vienne.

« Douze petits électro-aimants en fer à cheval sont fixés verticalement aux bras d'une étoile à six rayons, de telle manière que les lignes joignant leurs pôles soient situées dans la direction des rayons, les plans polaires étant alternativement dirigés vers les deux côtés de la base commune. Le système entier repose sur un axe qui le traverse librement par son centre et sur une petite roue servant de guide. Le plan de l'étoile servant de base aux électro-aimants est vertical à l'horizon, et reste

toujours parallèle à lui-même. Les deux bouts de cet axe sont fixés en permanence à deux roues dont les raies sont les électro-aimants. Dès qu'une moitié de ces aimants est excitée par le courant électrique, les armatures correspondantes sont soumises à une attraction latérale, et les roues, de même que leur axe commun, exécutent un tour jusqu'à ce que les armatures se trouvent en face de leurs plans polaires; le système entier progresse en conséquence le long de rails métalliques adaptés à cet effet. Ce mouvement accompli, un commutateur adapté à l'axe interrompt le courant dans les six premiers électro-aimants et le rétablit dans les six autres, de sorte qu'un nouveau mouvement progressif a lieu dans la même direction et est de la même valeur que le premier. Le courant est fourni par un générateur dont les pôles communiquent avec les rails. Chacune des parties de l'appareil est convenablement isolée, de sorte que le passage de l'électricité, d'une ligne de rails à l'autre, ne peut avoir lieu chaque fois que par une des séries de multiplicateurs attachés aux électro-aimants. »

Il est facile de voir que ce système n'est autre, en définitive, qu'une locomotive électrique, et nous allons voir que, comme appareil, il est moins simple que plusieurs autres que nous allons décrire.

Locomotive électrique de MM. Bellet et Ch. Rouvre. — Ce système imaginé en 1864, et destiné par leurs auteurs au service de la poste, est décrit de la manière suivante par M. Cazin, dans les *Mondes* du 15 décembre 1864.

« Sur deux rails en fer roule un chariot portant dans un coffre la correspondance; les deux roues postérieures sont en cuivre, et chacune d'elles porte vingt électro-aimants en fer à cheval équidistants. Leurs plans moyens se coupent suivant l'axe de la roue, et leurs surfaces polaires affleurent extérieurement la jante, de sorte que le rail sert d'armature successivement à tous les électro-

aimants pendant la rotation du chariot. Pour mettre ce chariot en mouvement, il faut faire passer le courant voltaïque dans la bobine la plus rapprochée du rail; alors son noyau de fer est attiré par le rail, et la roue tourne. La force attractive croît très rapidement à mesure que la distance du rail à la surface polaire diminue, et elle atteint son maximum au contact; à cet instant il faut ouvrir le circuit voltaïque et faire passer le courant dans la bobine suivante; les ouvertures et fermetures successives du courant sont produites par un interrupteur disposé sur l'axe des roues motrices et qui est essentiellement formé d'un anneau métallique isolé et d'un disque isolant portant sur son contour vingt plaques de métal pour distribuer le courant.

« L'anneau glisse sur un ressort de métal auquel est adapté un des rhéophores de la pile, tandis que le disque distributeur glisse sur un autre ressort auquel est adapté l'autre rhéophore. A chaque plaque de métal de ce disque est soudée l'extrémité du fil de l'un des électro-aimants, et l'autre extrémité est soudée à l'anneau isolé, de sorte que le circuit voltaïque est fermé quand il y a contact entre une plaque du disque et son ressort. Le même anneau sert pour les deux roues motrices, mais chacune d'elles a son disque distributeur, et comme les plaques de métal de l'un sont en face des intervalles des plaques de l'autre, le courant ne traverse qu'un électro-aimant à la fois, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. Enfin les électro-aimants de l'une des roues sont en face des intervalles de ceux de l'autre, de sorte qu'il y a attraction par le rail à chaque quarantième de tour.

« La pile peut être portée par le chariot, mais les auteurs préfèrent une pile fixe, à cause de la difficulté du maniement d'un grand nombre de piles et des frais de transport d'un poids mort relativement considérable, et aussi pour éviter le voisinage des piles et de la correspondance. Alors entre les deux rails sont posés deux fils

de métal isolés, sur lesquels roulent des galets de métal communiquant avec les ressorts de l'interrupteur; ces deux fils sont les rhéophores de la pile. Il est évident que pour arrêter la locomotive il suffit d'ouvrir le circuit. »

Locomotive électro-magnétique de M. Gaiffe. — Cette locomotive n'est qu'un modèle d'électro moteur qui se rapporte à la classe des moteurs à mouvement de rotation directe et dont les armatures réagissent sur une roue à rochet par l'intermédiaire d'un cadre qui peut se mouvoir de droite à gauche et de gauche à droite au moyen de deux leviers articulés qui le maintiennent suspendu.

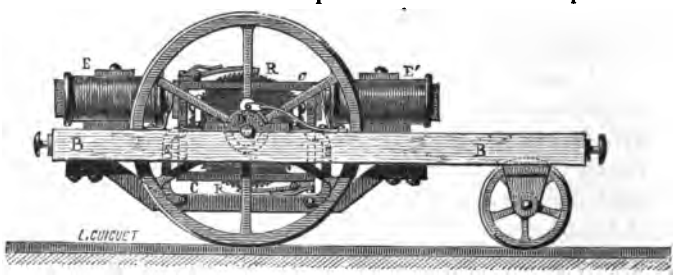


Fig. 53. — Locomotive de M. Gaiffe.

Ce cadre porte deux encliquetages qui, en réagissant sur la roue à rochet, la font tourner d'une dent à chacun des mouvements du cadre vers les électro-aimants. Le commutateur, comme dans tous les appareils de ce genre, est fixé sur l'axe de la roue motrice. Nous représentons figure 53 cette petite locomotive établie plutôt comme appareil de démonstration.

Un petit dispositif adapté au cadre oscillant permet de changer le sens de la marche de l'appareil, et il se trouve mis en action quand la locomotive arrive à l'extrémité de sa course sur le petit chemin de fer simulé sur lequel il roule.

IV. — APPLICATIONS PARTICULIÈRES DES ÉLECTROMOTEURS

Applications scientifiques. — Plumes Édison. — Roue phonique de M. Paul Lacour. — Gyroscope électro-magnétique, etc.

Les petits électromoteurs avaient été employés dès l'origine, comme nous l'avons déjà dit, dans certaines expériences de physique où l'on a besoin d'un mouvement

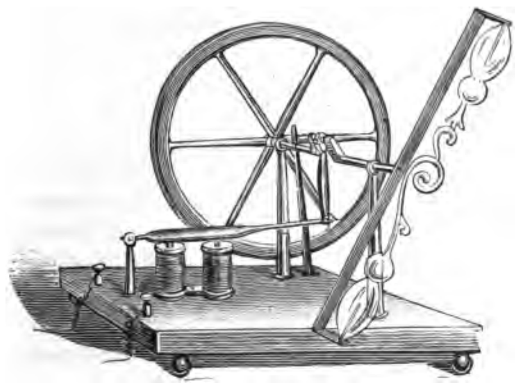


Fig. 54. — Appareil pour la rotation des tubes de Geissler.

rapide avec une force relativement importante, et dans certaines industries, notamment pour les machines à coudre, les machines à tréfiler et à recouvrir de soie ou de coton les fils métalliques, les tours, les machines à diviser; on les a encore employés pour faire marcher des embarcations, des orgues et pianos mécaniques, et certains mécanismes de télégraphie; pour certaines expériences d'optique, d'acoustique, d'électricité, entre autres pour la rotation de tubes de Geissler qui, avec le dispositif représenté figure 54, produisent des effets lumineux très remarquables. Enfin, en dehors des applications qu'il

en a faites aux bateaux, aux ballons, aux tricycles, au pianista, dont nous aurons occasion de parler dans la seconde partie de ce volume, M. Trouvé les a employés avec avantage pour la mise en marche des cylindres chronographiques, du gyroscope, des machines soufflantes appropriées à la respiration artificielle, des miroirs tournants destinés à mesurer la vitesse de la lumière ; il les a encore mis à contribution dans certaines industries chimiques et mécaniques pour malaxer certaines substances, pour percer, scier et fraiser ; et en les appliquant dans des dimensions microscopiques à diverses fonctions mécaniques, il a pu en faire des bijoux et curiosités électriques qui ont attiré beaucoup l'attention à une certaine époque. Mais l'une des applications les plus connues de ces électromoteurs est celle que M. Edison en a faite à sa plume électrique. Dans cet appareil que nous représentons figure 55, l'action mécanique à effectuer, consistant uniquement à donner à une aiguille un mouvement de va-et-vient très court et très rapide, l'électromoteur est réduit à sa plus simple expression et à des dimensions extrêmement petites. Il est en effet adapté à la partie supérieure d'une sorte de porte-crayon et n'occupe pas, avec les mécanismes qui en dépendent, un espace plus grand que 4 centimètres en hauteur et largeur et 2 en épaisseur. Il consiste uniquement dans un petit électro-aimant dont le plan est dans l'axe du porte-crayon traceur et devant sur les pôles duquel tourne un axe horizontal, pivotant sur pointes, une simple lame de fer formant le diamètre d'un petit volant adapté au même axe, et cet axe est muni lui-même d'une petite came qui agit sur les bords d'une échancrure pratiquée dans le support de l'aiguille perforatrice. A côté de cette came se trouve une double excentrique, qui, en agissant sur un ressort de contact, l'éloigne et le rapproche d'un butoir fixe (formant contact) quand l'armature coïncide avec la ligne axiale de l'électro-aimant et quand elle la croise à angle

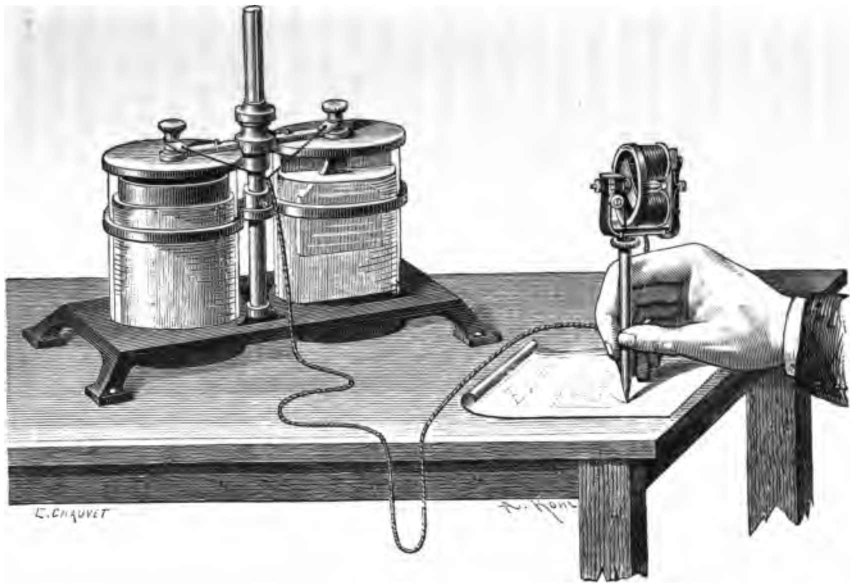


Fig. 55. — Plume de M. Edison.

droit suivant la ligne équatoriale. L'aiguille perforatrice traverse le porte-crayon et ne dépasse que d'un quart de millimètre environ, dans ses écarts extrêmes, la pointe du porte-crayon. Ce sont ces petits écarts de l'aiguille qui provoquent les perforations du papier sur lequel on écrit en suivant tous les contours tracés par le porte-crayon. En animant ce petit électromoteur avec deux éléments à bichromate de potasse du système Fowler, c'est-à-dire avec vase poreux, sa vitesse de rotation devient assez grande pour que les lignes tracées par la juxtaposition de tous les trous ainsi perforés les uns à côté des autres, présentent l'aspect de lignes continues.

Tout le monde connaît, du reste, la plume Edison, et nous n'avons pas besoin d'indiquer la manière de s'en servir; on sait que le papier ainsi perforé mécaniquement peut servir de maquette pour imprimer tel nombre de copies que l'on veut de l'écriture ou du dessin ainsi reproduit. Il suffit pour cela de l'encrer par derrière et de faire pénétrer l'encrage à travers les trous au moyen d'une presse.

Nous verrons, dans la seconde partie de ce volume, que dans ces derniers temps les petits moteurs ont été beaucoup mieux utilisés en raison de la plus grande force qu'on a pu leur donner, et il est certain que leur usage se répandra de plus en plus. En attendant, nous allons décrire quelques applications intéressantes qui en ont été faites aux expériences de précision par M. Paul Lacour, de Copenhague, et par M. Trouvé.

Roue phonique de M. Paul Lacour. — Les petits électromoteurs à mouvement de rotation directe ont donné l'occasion à M. Paul Lacour, de Copenhague, de créer un petit instrument remarquable par l'uniformité de son mouvement, et qui a pu être employé avec avantage dans certains instruments de précision comme régulateur. Ce petit appareil est connu sous le nom de *roue phonique*.

Cette roue, comme nous le disions, n'est, à proprement parler, qu'un petit électromoteur disposé de telle façon qu'étant mis en mouvement par des vibrations électriques déterminées sous l'influence d'un électro-diapason, il acquiert un mouvement aussi uniforme que les vibrations du diapason lui-même, et que ne peuvent troubler les réactions mécaniques extérieures tant qu'elles ne sont pas assez fortes pour l'arrêter. Nous représentons, figure 56, la roue phonique réduite à sa plus simple expression. C'est, comme on le voit, une roue dentée en fer doux, mobile autour de son axe, et devant laquelle est fixé un électro-aimant droit dont l'un des pôles, animé à son extrémité, peut réagir sur les dents de cette roue



Fig. 56. — Roue phonique.

sans les toucher et à la manière des électromoteurs à mouvements directs.

Si à travers cet électro-aimant sont transmis une série de courants également espacés, envoyés par un électro-diapason, il résultera de sa réaction sur les dents de la roue une série d'effets attractifs qui pourront entretenir un premier mouvement communiqué à cette roue, et même le rendre complètement uniforme, quand cette vitesse sera telle, que la roue parcourra pour chaque période de courant un chemin égal à la distance qui existe entre deux dents consécutives. Ces courants, ainsi transmis, sont distribués par un électro-diapason dont nous représentons le dispositif figure 57, et la liaison

des deux appareils entre eux et avec la pile est indiquée figure 58.

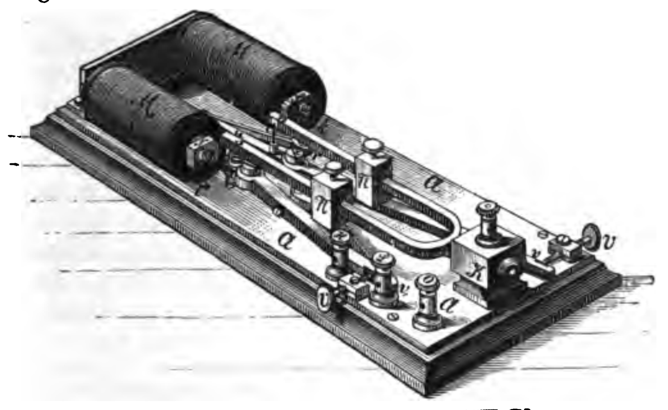


Fig. 57. — Électro-diapason rhéotomique.

Pour qu'on puisse comprendre le mode de fonctionnement de cet appareil, examinons ce qui se passe quand

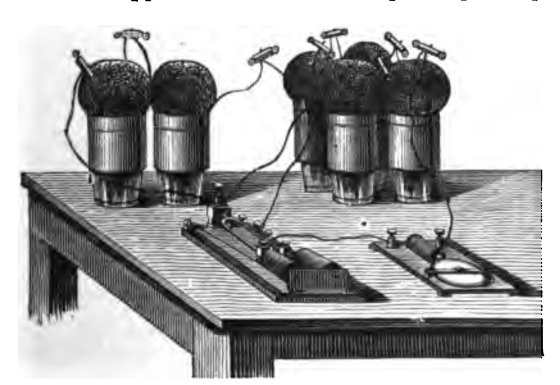


Fig. 58. — Disposition générale des appareils.

une dent de la roue phonique passe devant l'électro-aimant qui l'actionne, et supposons que le rayon de cette

roue, passant par la ligne médiane de la dent, soit représenté par les lignes *rs*, *rt*, figure 59, le trait *m* indiquant la position de l'axe polaire de l'électro-aimant. Enfin, considérons ce qui a lieu quand le pôle *m* se présente au milieu de la dent, ou bien en avant et en arrière ; ces trois cas sont représentés figures 59, 60 et 61.

Il est certain que dans le premier cas, représenté figure 59, l'action exercée sur la dent étant égale de part et d'autre, la roue sera alors dans un état d'équilibre stable, et sa vitesse ne sera pas influencée par l'aimant ; mais il n'en sera pas de même dans les deux autres cas, car dans celui représenté figure 60, une accélération devra résulter de l'action de l'aimant qui tendra à faire coïncider la ligne *rs* avec son axe, et dans le cas re-



Fig. 59. Fig. 60. Fig. 61

présenté figure 61, il devra y avoir, au contraire, ralentissement par la raison inverse.

Il arrivera donc que, si les dents se présentent successivement en *s* (fig. 59), au moment où commencent les effets attractifs, la vitesse de la roue subira, il est vrai, grâce à ces attractions intermittentes, *une variation pendant chaque onde*, mais la vitesse moyenne de la roue ne subira pas de variation, et, somme toute, la roue sera pendant son mouvement en état d'équilibre par rapport aux attractions intermittentes.

La position qu'aura à tout moment cette roue en équilibre mobile est évidemment fonction du temps, et nous la désignons sous le nom de position d'équilibre mobile ; on pourra s'assurer qu'elle existe bien réellement en

poussant ou en retenant un peu la roue dans son mouvement. En effet, si on la retient, l'attraction l'accélérera plus qu'elle ne la retardera, et la vitesse en *t* sera alors plus grande qu'en *s*. Si, au contraire, on augmente la vitesse de cette roue, l'action retardatrice l'emportera sur l'action accélératrice, et la vitesse en *t* sera moindre qu'en *s*. Il y aura donc compensation, et, puisqu'une petite déviation communiquée à la roue dans quelque sens que ce soit est compensée et rendue nulle, grâce aux attractions intermittentes, l'équilibre mobile dont nous avons parlé constitue, par le fait, un état d'équilibre stable.

« L'expérience, dit M. Paul Lacour, confirme cette théorie. Si un diapason électro-magnétique réagit sur un courant passant à travers l'électro-aimant d'une roue phonique, comme on le voit figure 58, cette roue, une fois qu'elle a reçu un mouvement qui fait passer devant le pôle électro-magnétique une dent par onde, conservera un état de mouvement uniforme que nous appellerons *un mouvement réglé*, et qui est analogue et conforme, à beaucoup d'égards, à l'état de mouvement (*le repos*) où se trouverait la roue quand une dent déterminée est attirée dans la direction du pôle.

« Si la roue phonique est dans son mouvement réglé et qu'une force externe tende à l'écarter un peu de la position d'équilibre mobile, le courant phono-électrique tendra à l'y ramener. Mais si cette force reste constante, la roue, tout en gardant sa vitesse de rotation, trouvera une autre position d'équilibre mobile qui dépendra de la valeur de la force et de sa direction par rapport au sens de la rotation. Or, c'est cette permanence de la vitesse de la roue phonique malgré les forces étrangères qui peuvent agir sur elle, qui permet de l'appliquer avantageusement aux chronographes et aux appareils exigeant des mouvements synchroniques. Toutefois, ces forces ne doivent pas dépasser une certaine limite, car la roue ne tourne que sous l'influence d'une force représentée par

la différence ***sm* — *st***, qui peut atteindre tout au plus la valeur de $+$ ***st***, ou de — ***st***, et si la force externe dépasse cette valeur, l'équilibre mobile est rompu, alors la vitesse de la roue peut être accélérée ou retardée suivant le sens de cette force externe.

« La valeur de la force mécanique la plus grande, mesurée jusqu'à présent, est d'un kilogrammètre par minute.

« Hors du mouvement réglé, il est certaines autres vitesses pour lesquelles la roue phonique peut être en position d'équilibre mobile et s'y maintenir. Ainsi, si la roue tourne avec une vitesse moitié moins grande que celle qui se rapporte au mouvement réglé et qui fasse qu'il ne passe devant le pôle qu'une dent pour deux ondes du courant phono-électrique, le rapport de chaque dent à l'une des deux ondes sera exactement le même que celui dont nous avons parlé pour la roue en mouvement réglé, et cette onde maintiendra la stabilité de l'équilibre mobile, qui pourrait même être encore maintenu par l'autre onde si le pôle magnétique et les dents de la roue présentaient une arête aiguë.

« Des considérations du même genre peuvent s'appliquer à d'autres vitesses, et l'on peut conclure, d'une manière générale, que ***la roue phonique peut se maintenir en rotation avec des vitesses qui sont les sous-multiples et les multiples les plus voisins de la vitesse du mouvement réglé de rotation***. Par conséquent, on pourrait bien obtenir ce mouvement avec des vitesses égales aux deux tiers et aux trois demies de celle du mouvement réglé, lesquelles vitesses sont celles qu'aurait la roue phonique avec un mouvement réglé déterminé par des courants phono-électriques, dont le son serait plus grave ou plus aigu d'une quinte.

« Il va sans dire qu'avec toutes ces vitesses, la roue tourne également bien dans les deux sens. »

Pour obtenir de la part d'une roue phonique un mou-

vement réglé exempt de variation, il suffit d'adapter au-dessus de sa surface supérieure une capsule cylindrique remplie de mercure, comme on le voit figure 62. Cette capsule, qui doit être en bois, est creusée de manière à présenter une auge annulaire fermée par un couvercle également en bois, fixé au moyen de colle forte. L'effet produit par cette capsule n'est pas seulement celui d'une simple augmentation d'inertie qu'on donne au système, mais une atténuation constante des oscillations de vitesse, par le développement d'un effet de force vive imprimé au

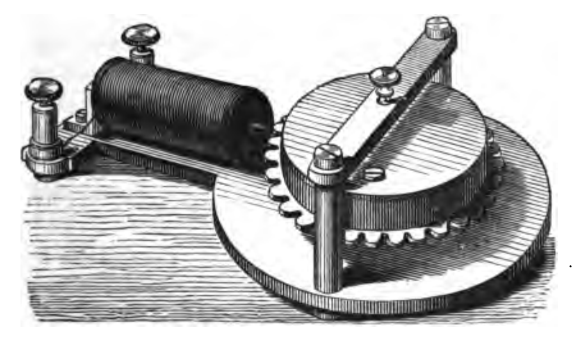


Fig. 62. — Roue phonique à mouvement réglé.

mercure à chaque oscillation, lequel se trouve annulé par l'oscillation suivante.

Gyroscope électro-magnétique. — M. Trouvé a appliqué très ingénieusement la disposition d'électromoteur que nous avons décrite page 109 au gyroscope de Foucault, dans le but d'entretenir assez longtemps son mouvement pour le rendre propre à démontrer d'une manière bien nette le mouvement de rotation de la terre. Dans cet appareil, le tore destiné à entrer en mouvement rapide, est constitué par un système magnétique du genre de celui dont nous venons de parler, mais muni de huit électro-aimants droits réunis sur une même culasse cylindrique. Ces électro-aimants constituent par conséquent une sorte

de disque qui, pour former un tore, n'a besoin que d'être noyé dans une masse de matière isolante, moulée dans cette forme ; et pour rendre l'illusion complète, il suffit de recouvrir le tore ainsi formé d'une enveloppe de cuivre, ce que l'on obtient facilement au moyen de la galvanoplastie. Quand la pièce a été de cette manière bien tournée, bien équilibrée au moyen de vis par rapport à son centre de gravité, et que les huit pôles magnétiques ont été mis à nu pour ne pas voiler leur action, il suffit de la placer à l'intérieur de la bague de fer dont nous avons parlé pour les autres électromoteurs de ce genre, pour en faire, avec l'intermédiaire d'un commutateur dont nous allons indiquer la disposition, un électromoteur dont la partie mobile sera le tore, si la bague de fer est suspendue, comme celle des gyroscopes ordinaires, à une potence fixe. Comme cette bague ainsi que le tore se trouvent dans un plan parfaitement vertical, on comprend que l'appareil étant mis en mouvement pendant un temps assez long, et le plan du système mobile ne pouvant se déplacer dans l'espace, par l'effet même de son mouvement, il arrivera que le support de la potence se déplacera par rapport à ce plan sous l'influence de la rotation de la terre, et l'arc dont il se sera déplacé pourra indiquer celui que la terre a à accomplir pendant l'espace de temps constaté. On comprend seulement qu'il faut, pour obtenir ce résultat, une grande précision de construction de l'instrument, et il paraît que cette précision a été obtenue dans deux appareils construits par M. Trouvé, et qui ont été livrés à M. Jacobi et au musée de Kensington.

Le commutateur de cet électromoteur est placé sur l'une des joues du noyau central du tore, et se trouve constitué, d'un côté par huit contacts rangés circulairement et qui sont reliés aux électro-aimants, d'un autre côté par un disque de platine porté par un ressort et qui présente en l'un de ses points un renflement. Comme ce renflement doit toujours buter entre deux chevilles afin

qu'il ne réagisse pas mécaniquement sur le moteur, le disque de platine est relié au ressort qui le porte par l'intermédiaire d'un disque de cuivre et de deux vis qui, pouvant se mouvoir dans deux rainures circulaires pratiquées dans le disque de cuivre, permettent de fixer le disque de platine dans la position voulue.

Les contacts eux-mêmes sont disposés de manière que les électro-aimants fonctionnent par couples aux deux extrémités d'un même diamètre du tore, et avant qu'ils atteignent la partie la plus élevée des deux renflements de la bague de fer qui sert de support au système mobile. De plus, comme les contacts déterminés par le disque de platine s'effectuent sur deux des pointes du commutateur à la fois, ces deux pointes sont reliées métalliquement entre elles pour ne donner issue au courant qu'à travers un seul couple d'électro-aimants ; de sorte qu'il n'y a par le fait de produites que quatre fermetures et interruptions de courant par tour du système mobile, et ces fermetures donnent lieu à quatre impulsions successives qui peuvent provoquer une vitesse très grande de rotation du système mobile, si les interruptions sont faites en temps voulu. L'expérience a montré que pour provoquer le maximum de vitesse, il fallait qu'elles se fissent un peu avant l'arrivée des électro-aimants devant la partie la plus saillante des renflements de la bague de fer ; mais, pour obtenir le maximum de force, on a reconnu que ces interruptions devaient être faites immédiatement après l'effet attractif le plus énergique.

Comme pour dévier sous l'influence du mouvement de rotation de la terre, le système entier avec son commutateur doit être suspendu à un fil sans torsion, il a fallu, pour conduire le courant au ressort frotteur et aux contacts du commutateur à travers les électro-aimants, employer un système de liaison métallique constitué par du mercure. M. Trouvé a, en conséquence, muni, suivant la verticale passant par son centre, la bague de fer de

l'appareil d'une petite tige de platine immergée dans une coupe de mercure, et le ressort du commutateur porté par cette bague, mais isolé d'elle métalliquement, s'est trouvé mis en rapport avec une seconde tige de platine plongée dans une rigole circulaire également remplie de mercure et entourant la coupe. Les deux pôles de la pile étant mis en communication avec ces deux capacités pleines de mercure, le courant pouvait être de cette manière facilement transmis au système mobile sans l'empêcher de se déplacer librement dans son plan.

On pouvait craindre qu'un système électro-magnétique de ce genre ne fût susceptible d'être impressionné par le magnétisme terrestre, mais comme les pôles extérieurs des électro-aimants sont tous de même nom et réagissent simultanément sur la bague de fer aux deux extrémités de son diamètre, il n'existe pas dans ce système de ligne nord-sud, et l'appareil se trouve toujours, par rapport au magnétisme terrestre, dans une position d'équilibre instable qui ne peut empêcher les effets dus au mouvement de rotation de la terre de se produire.

V. — MOTEURS ÉLECTRO-CHIMIQUES

Depuis longtemps, on avait eu l'idée d'appliquer la force expansive des gaz détonants à la marche d'un moteur; Huyghens, on se le rappelle, avait pensé utiliser à cet effet la poudre à canon, et dans son idée, la machine devait être disposée à peu près de la même manière que les premières machines à vapeur, dites *pompes à feu*. Ce fut en perfectionnant l'idée d'Huyghens que Papin fut conduit à la découverte de la machine à vapeur. Toutefois, les dangers qui pouvaient résulter d'un déploiement de force vive aussi instantané, empêchèrent longtemps le développement de ces sortes de moteurs, dans lesquels, d'ailleurs, le dispositif inflammatoire n'avait jamais été

établi d'une manière satisfaisante. Quand les effets calorifiques de l'électricité furent connus, quelques inventeurs reprirent l'idée d'Huyghens, en employant comme mélange détonant, non plus de la poudre, mais du gaz hydrogène mêlé à de l'air atmosphérique ou à de l'oxygène, et en l'enflammant avec l'étincelle électrique ou avec des courants assez intenses pour faire rougir un fil. Il y a une trentaine d'années, les journaux faisaient grand bruit d'une machine de ce genre, inventée par le docteur Carrosio, de Gênes, et en 1852, certains journaux décrivaient un moteur électro-chimique de M. A. Moeff, qui paraissait avoir été assez bien étudié[1], et qui avait donné quelques résultats. Toutefois, ce n'est qu'en 1860 que ce système de moteur a été établi dans des conditions pratiques par M. Lenoir, et pendant longtemps il a été appliqué avec avantage dans l'industrie. Ce n'est que quand les machines à gaz d'Otto sont venues, qu'on l'a abandonné, parce qu'il était moins économique. Quoi qu'il en soit, en historiens fidèles de la science, nous devons décrire cette machine qui a eu pendant quelque temps un certain retentissement. Nous la représentons figure 63, et nous en donnons, figures 64 et 65, les détails du mécanisme.

L'aspect général de la machine est celui d'un moteur à vapeur horizontal. Le cylindre est placé horizontalement sur un bâti en fonte supporté par un socle de pierre de taille, et la bielle avance entre deux glissières. A un bout de l'arbre se trouve le volant régulateur de vitesse, et à l'autre la poulie de transmission. Le piston et les tiroirs seuls sont d'une disposition particulière, à cause du système électrique. Dans ce système, le modérateur de Watt, à force centrifuge, est conservé, et le générateur si encombrant et si lourd dans les machines à vapeur est supprimé.

Le gaz mélangé à l'air atmosphérique dans la propor-

1. Voir la description de cette machine dans l'*Exposé des applications de l'électricité* de M. Th. du Moncel, 2e édit., tome III, p. 311.

tion de 8 à 10 pour 100, arrive au cylindre par le tube E (fig. 63) et les réservoirs de distribution R, R' (fig. 64 et 65) qu'ouvre en temps convenable, par l'intermédiaire

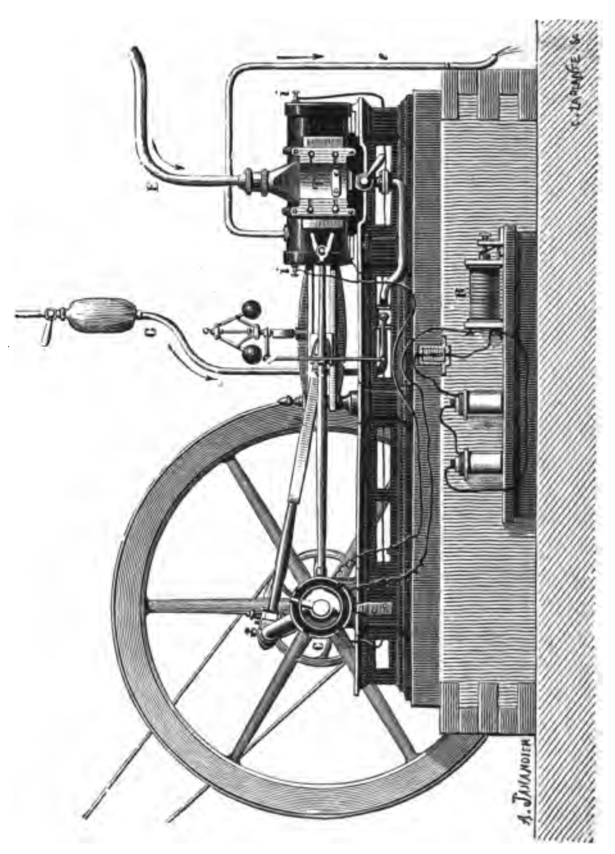


Fig. 63. — Moteur électro-chimique de M. Lenoir.

des conduits *ab*, *cd*, un jeu de tiroirs manœuvré par une tige X. Deux excitateurs d'étincelles électriques, constitués par deux simples fils de platine adaptés à des isolateurs encastrés en I et I' aux deux extrémités intérieures

du cylindre de la machine, sont mis en relation avec le fil induit d'une bobine de Ruhmkorff animée par deux éléments Bunsen, et peuvent, sous l'influence d'un commutateur M manœuvré par la tige X, provoquer une série d'étincelles au moment où le piston P, étant arrivé aux extrémités de sa course, doit rétrograder sous l'influence

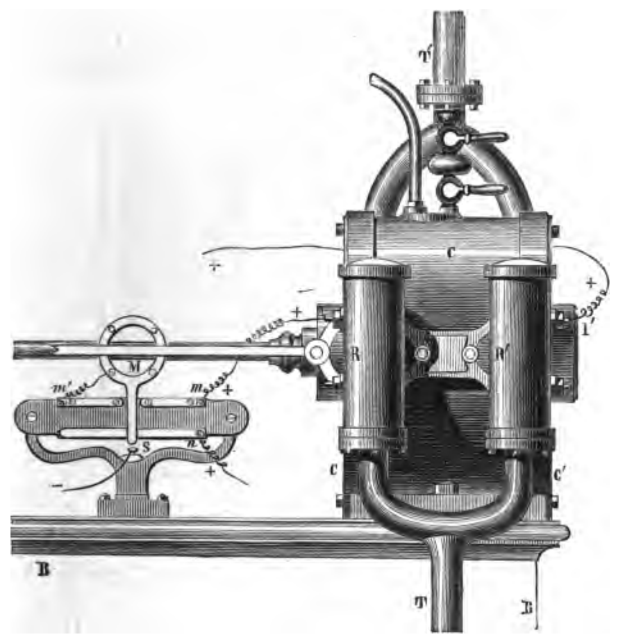


Fig. 64. —Détail du moteur électro-chimique.

de l'expansion du gaz alors introduit devant lui. En raison de cette condition de la production de l'étincelle, la bobine d'induction ne doit pas avoir de trembleur, et l'étincelle doit résulter de la seule interruption du courant par le commutateur qui la transporte en même temps d'une extrémité à l'autre du cylindre, d'après le jeu du tiroir.

Sous l'influence de l'étincelle, l'hydrogène se combine à l'oxygène de l'air pour former de l'eau, et la température produite par la combinaison suffit pour dilater le reste du mélange gazeux; comme ce phénomène s'effectue successivement sur les deux faces du piston, il en résulte un mouvement de va-et-vient qui se transforme en mouvement circulaire, comme dans les machines ordinaires. A chaque fois que le piston parvient au bout de sa course, le gaz qui vient d'agir s'échappe du cylindre par

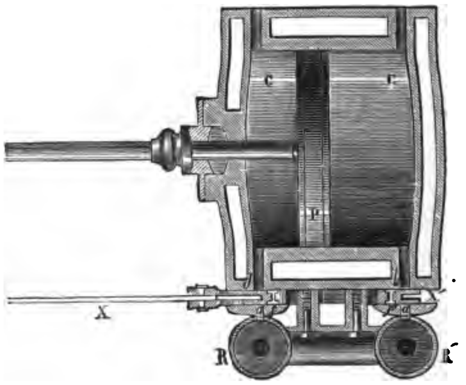


Fig. 65. — Détail du moteur électro-chimique.

des orifices spéciaux et passe dans le tuyau T' qui le verse dans l'atmosphère.

Cette machine marche instantanément et s'arrête tout aussi aisément. C'est une machine de petit atelier qui pouvait rendre à ce titre de grands services.

L'un des inconvénients de cette machine était le développement trop grand de la chaleur à l'intérieur du cylindre, chaleur qui aurait pu entraîner le grippement et la déformation des pièces mobiles, si on n'avait pris le soin de le refroidir à l'extérieur. On y est à peu près parvenu à l'aide d'une couche d'eau froide qu'on a fait

circuler autour de l'appareil par l'intermédiaire d'un manchon dans lequel le cylindre est placé, et cette couche d'eau s'écoule d'elle-même pour être renouvelée lorsqu'elle a atteint une certaine température. Dans les derniers modèles de cette machine, on avait remplacé, avec avantage, la pile de Bunsen par une pile thermo-électrique de Clamond qui était alimentée, comme le moteur lui-même, par le gaz d'éclairage.

SECONDE PARTIE

DEUXIÈME PHASE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

I. — MACHINES RÉVERSIBLES

Introduction d'un principe nouveau dans la recherche du moteur électrique. — L'induction. — Le champ magnétique. — Les machines à induction, leurs formes actuelles. — La réversibilité. — Généralité de ce principe.

Comme on l'a pu voir, la recherche d'un moteur électrique, d'un appareil propre à produire des travaux mécaniques par l'électricité, s'est, jusqu'au point où nous sommes, à peu près renfermée dans l'application et le développement mécanique d'un seul principe : l'attraction d'une armature de fer doux par un électro-aimant ou un solénoïde. Il était naturel que l'on commençât par là ; le mouvement ainsi produit, qui est la base de la télégraphie, était jusqu'alors le seul qu'on eût obtenu par l'électricité, et il constitue certainement un travail mécanique, extrêmement faible, il est vrai, mais enfin mathématiquement appréciable. On ne pouvait manquer de chercher d'abord à grandir ce travail, à le multiplier de façon à obtenir enfin des travaux mécaniques sérieux, ce qu'on nomme communément de la force. On a vu pour quels

motifs on n'a pas rencontré le succès dans cette voie.

Mais tandis que des essais habiles et persévérants s'accumulaient infructueusement de ce côté, un autre principe se développait peu à peu, une autre action électrique recevait des applications de plus en plus nombreuses, et c'est de là que devait venir enfin la réussite.

Cette action a été nommée induction par Faraday, qui l'a découverte en 1832, et voici comment on peut la manifester. On prend un aimant, d'une part, et de l'autre un fil conducteur communiquant par ses deux bouts avec un galvanomètre un peu sensible ; ce fil forme d'ailleurs un circuit fermé et n'est en communication avec aucune source d'électricité, aussi le galvanomètre n'y manifeste t-il aucun courant électrique dans l'état ordinaire ; mais si l'on prend ce fil et qu'on l'approche d'un des pôles de l'aimant, le galvanomètre montre un courant qui dure tout le temps que le fil est en mouvement pour s'approcher de l'aimant ; quand le fil s'arrête, le courant disparaît ; si on l'éloigne, un nouveau courant de sens contraire au premier prend à son tour naissance pendant le mouvement et s'éteint lorsque le mouvement finit.

Ainsi on obtiendra un courant électrique dans un fil toutes les fois qu'on le mettra en mouvement en présence d'un pôle d'aimant. Il convient cependant de préciser un peu ; théoriquement le fait se produirait à quelque distance que l'on se place ; en réalité l'action s'affaiblit rapidement avec la distance, et pour que les courants d'induction soient sensibles, on doit s'approcher le plus possible du pôle magnétique. La région de l'espace où le pôle d'un aimant fait sentir son influence, s'appelle le *champ magnétique* de ce pôle. Il arrive même fréquemment que l'on considère l'action magnétique sans la rattacher à une origine déterminée, et qu'on parle d'un champ magnétique sans prendre soin d'indiquer quelle est la cause qui le fait naître ; celle-ci peut d'ailleurs être variable ; on sait, en effet, que l'on peut produire des

actions magnétiques soit par des aimants permanents, soit par des électro-aimants, soit même par des courants; ces divers moyens peuvent créer un champ magnétique et donner lieu à des inductions : on ne tarda pas à les utiliser.

On conçoit en effet quel intérêt présente ce principe; il fournit le moyen d'obtenir un courant électrique par le déplacement d'un fil dans certaines conditions déterminées, c'est-à-dire par un mouvement; il apporte donc la transformation directe du mouvement, ou autrement de la force, en électricité.

Il sera intéressant de rappeler comment les machines sont nées de l'expérience de Faraday. Nous avons vu en effet que celle-ci consiste à obtenir un courant de courte durée en faisant passer un fil conducteur, à portée d'un pôle d'aimant, dans ce que nous avons nommé un champ magnétique; pour tirer de là une machine, il faudra trouver le moyen de répéter ce passage aussi fréquemment que possible et de recueillir les courants résultants; on aura ainsi une succession de courants à peu près instantanés, dont l'ensemble pourra être assimilé à une production électrique continue si les actions se succèdent avec une suffisante rapidité.

Il conviendra de plus de faire passer à la fois dans le champ magnétique le fil le plus long possible, Faraday ayant démontré que plus il y a de fil soumis à l'action magnétique, plus cette action est énergique (cela se comprend d'ailleurs, le champ magnétique agissant à la fois sur toutes les parties du fil). Enfin Faraday avait reconnu que les effets étaient considérablement accrus si les fils soumis à l'action magnétique, ceux qu'on nomme les fils induits, étaient enroulés autour de morceaux de fer doux, dont les réactions magnétiques agissent pour renforcer celles du champ inducteur.

On se trouve donc amené à donner à l'organe induit la forme d'une bobine de fil enroulée autour d'un noyau de fer, et l'action inductrice sera développée en faisant

passer aussi rapidement et aussi souvent que possible cette bobine devant le pôle d'un aimant qui sera l'organe inducteur. A cet effet, le moyen le plus simple et celui qui a été adopté dès l'origine, c'est d'attacher la bobine à un axe tournant rapidement dont la rotation lui fera traverser le champ magnétique.

Ces principes furent appliqués dans la machine bien connue de Pixii, créée vers 1832, très peu de temps après les découvertes de Faraday. Elle était la simple application des idées exposées ci-dessus. Un aimant tournait devant deux bobines fixes, disposition peu commode que l'inventeur avait employée sans doute parce qu'il ne savait trop comment recueillir le courant des bobines tout en les faisant tourner. La machine de Clarke la remplaça bientôt; dans celle-ci deux bobines tournaient devant un aimant, et le courant était recueilli par des ressorts frottant sur des pièces cylindriques de métal. Ce dispositif ingénieux et alors nouveau, remplissait même un autre emploi. Nous avons dit que lorsqu'un fil traversait un champ magnétique il s'y développait deux courants, le premier d'un certain sens lorsque le fil s'approche du pôle magnétique, le second, en sens contraire quand il s'en éloigne; les machines que nous venons de citer donnent donc une série de courants se succédant rapidement et alternativement en sens contraire; aussi sont-elles de la classe des machines nommées *alternatives*. Dans la machine dite de Clarke, la pièce mobile sur laquelle reposent les ressorts frotteurs qui emmènent le courant, est disposée de façon à trier ces courants inverses et à les redresser dans le circuit extérieur.

Le point de départ ainsi donné, ce type de machines, nommé type *magnéto-électrique*, alla se développant par une sorte de bourgeonnement, c'est-à-dire par une accumulation et une multiplication de parties semblables. Au lieu de mettre deux bobines autour de l'axe, on en disposa un certain nombre en cercle, au lieu d'un seul pôle

d'aimant, on en plaça autant qu'il y avait de bobines; on juxtaposa ensuite sur un même axe un nombre plus ou moins grand de systèmes semblables au premier, et ainsi se forma, par une suite de perfectionnements, la première machine ayant fourni des résultats industriels, la machine dite de l'*Alliance*, encore en usage aux phares de la Hève et qui reçut sa forme définitive vers 1856. Il est utile de dire qu'avec cette mutiplication des organes, on avait été conduit à renoncer au redresseur des courants qui porte le nom de Clarke; ces machines restèrent donc alternatives.

Assez longtemps après l'invention de ces machines, commença à s'introduire un important perfectionnement: il consistait à remplacer les aimants jusqu'ici employés comme organes inducteurs par des électro-aimants; on sait que ceux-ci peuvent être beaucoup plus énergiques que les autres, seulement il semble d'abord qu'on introduise ainsi une complication inévitable; en effet, si nous voulons faire usage d'électro-aimants, il nous faudra un courant pour les produire; nous serons donc obligés d'avoir déjà un courant pour être à même d'en obtenir un autre, plus puissant que le premier. On verra tout à l'heure par quel détour singulier et inattendu on tourna cette difficulté; au commencement on l'accepta. La machine de Wilde, créée vers 1864, se composait de deux machines superposées; l'une avait pour inducteur un aimant permanent, elle envoyait son courant dans des fils enroulés autour de plaques de fer, celles-ci devenaient des aimants larges et puissants servant d'organes inducteurs à la deuxième machine, laquelle fournissait le courant utile. Dans l'intervalle de temps écoulé jusqu'à la production de cette machine, l'organe induit (autrefois composé, comme nous l'avons dit, de nombreuses bobines juxtaposées) s'était simplifié et réduit à une seule bobine longue nommée, du nom de son inventeur, *bobine de Siemens;* cette forme est représentée plus loin (fig. 69).

Bientôt parut à l'Exposition de 1867 une machine très curieuse, celle de Ladd. Dans cet appareil, deux bobines induites étaient placées entre deux plaques de fer l'une à un bout, l'autre à l'autre; l'une de ces bobines, en tournant, envoyait son courant dans des fils enroulés autour de ces plaques de fer, comme faisait tout à l'heure la première partie de la machine de Wilde; ces plaques s'aimantaient, et la deuxième bobine fournissait un courant disponible.

On est ici immédiatement frappé d'une apparente absurdité. Comment se fait-il que la première bobine, au moment où elle commence à tourner, puisse produire un courant?... il lui faudrait un organe inducteur, un aimant, et elle n'en a pas, puisqu'elle est chargée de le faire; c'est son courant qui doit créer l'aimant, et ce courant ne peut naître que si l'aimant existe : il y a un cercle vicieux, cela est vrai, et pourtant la machine marche; cela tient à ce qu'il n'existe pas de fer absolument exempt d'aimantation; si peu qu'il en renferme, cela suffit pour que la première bobine reçoive une action inductrice et engendre un courant : il est d'abord très faible, mais comme il est employé à renforcer l'aimantation, il s'augmente aussitôt, et l'action s'accroît ainsi jusqu'à la limite de la force motrice. Ce principe curieux et fécond n'est pas dû à M. Ladd, il avait été énoncé presque en même temps par MM. Wheatstone et Siemens; cependant la priorité officielle paraît appartenir à M. Siemens.

Ainsi se trouve constitué le type de machines nommées dynamo-électriques, parmi lesquelles se placent tous les types récents et les machines les plus en usage dont les types les plus saillants sont jusqu'ici la machine de Gramme et la machine de Siemens.

La première a eu d'abord la forme représentée (fig 66.)

Comme on le voit, l'organe inducteur est un aimant en fer à cheval ONS. La machine est donc magnéto-électrique. L'induit a reçu une forme particulière. Il se compose d'un anneau de fer doux sur lequel est enroulé le fil induit.

Cet anneau est disposé sur un axe entre les deux pôles de l'aimant, qu'on a d'ailleurs le soin de prolonger par des épanouissements A et B afin de mieux embrasser l'anneau à induire. Le fil induit qui recouvre ce dernier est divisé en sections dont les bouts sont amenés sur une pièce cylindrique nommée collecteur, qui se voit en M et sur laquelle frottent deux ressorts métalliques ou mieux,

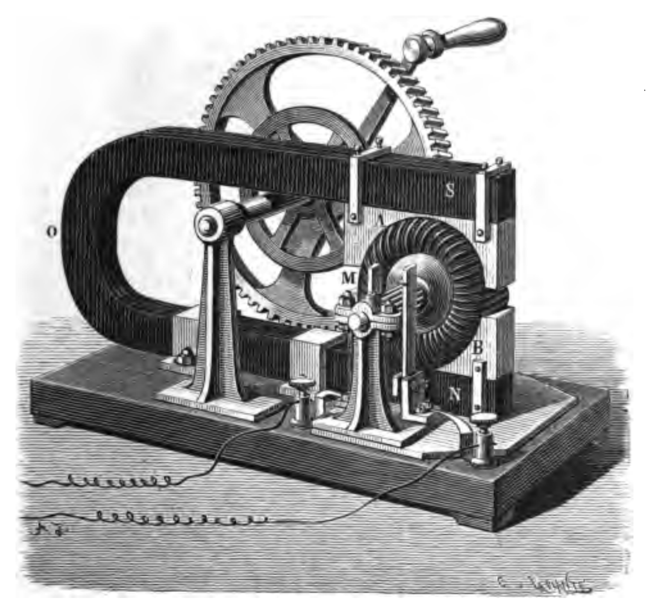


Fig. 66. — Première machine de Gramme.

ainsi que nous l'avons expliqué déjà, deux balais de fil de métal. Ces balais recueillent le courant et permettent de l'envoyer dans le circuit où il doit être utilisé (voir Th. du Moncel, *Éclairage électrique*).

Bientôt les perfectionnements que nous avons résumés furent introduits dans cet appareil, qui reçut la forme représentée figure 67. L'induit est resté le même, il a conservé

la forme annulaire qui est le trait essentiel de ces machines; l'aimant permanent a disparu, et il est remplacé par deux électro-aimants dont les pôles viennent s'épanouir autour de l'anneau. Le collecteur et les balais n'ont pas varié; du reste on les retrouve dans presque toutes les machines créées dans ces dernières années. Comme

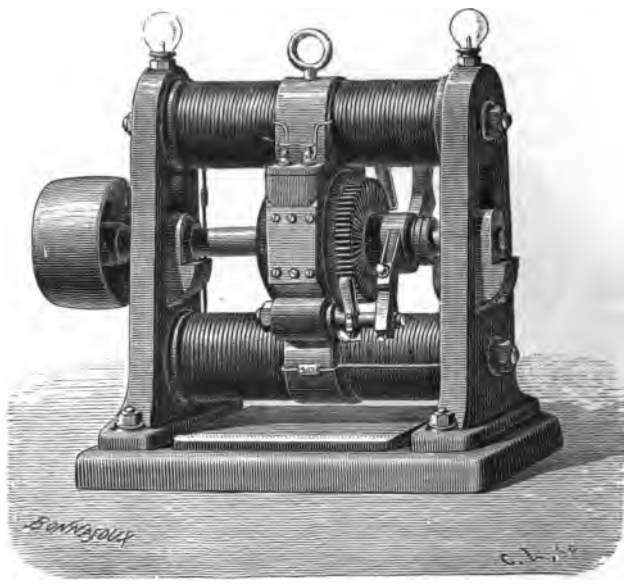


Fig. 67. — Machine de Gramme type ordinaire. (A.)

on le verra plus loin, la machine de Gramme a reçu d'autres dispositions : celle-ci est une des plus fréquentes.

La machine de Siemens diffère de la précédente par la forme de son induit. Comme on peut le voir par la figure 68, cet organe n'a plus la forme d'un anneau, il est plutôt assimilable à un cylindre sur lequel les fils sont couchés en long parallèlement à son axe; la rotation de ce cylindre les amène ainsi successivement dans les champs

68. — Machine de Siemens type ordinaire

magnétiques de deux électro-aimants placés l'un au-dessus, l'autre au-dessous de l'induit (ils sont quelquefois horizontalement couchés l'un à droite l'autre à gauche). Le fil induit est d'ailleurs, comme dans la machine de Gramme, disposé en sections successives communiqnant entre elles, en même temps qu'elles aboutissent à un collecteur que l'on voit à droite de la figure et sur lequel s'appuient des balais frotteurs.

Nous avons cru nécessaire de donner de ces machines une description de quelque étendue, parce qu'elles se rencontrent constamment dans les industries électriques. Il est d'ailleurs nécessaire que leur forme soit présente à l'esprit du lecteur, car elles sont, comme on le verra, les principaux agents de la production et du transport de la force par l'électricité.

Le lecteur a pu, en effet, se demander jusqu'ici dans quelle voie nous nous égarions ; il s'agit dans cet ouvrage de machines propres à produire le mouvement, et il n'a été question dans ce chapitre que de machines propres à produire de l'électricité. Les deux résultats ne sont pas si différents qu'on pourrait le croire. Ils sont au contraire absolument connexes, en raison d'une propriété remarquable que possèdent les machines dont nous parlons. Jusqu'à présent nous avons supposé qu'en dépensant de la force nous faisions tourner notre conducteur mobile dans le champ magnétique, et par ce moyen nous avons recueilli de l'électricité ; actuellement faisons le contraire, envoyons de l'électricité dans notre anneau mobile, nous le verrons immédiatement se mettre en mouvement, et arriver à une rotation rapide ; si nous placons sur l'axe de l'anneau une poulie avec courroie ou un engrenage, nous pourrons utiliser cette rotation et en tirer de la force ou, pour parler avec précision, du travail. Ainsi, dans la petite machine Gramme (fig. 66), si nous tournons la manivelle, nous aurons un travail à dépenser, mais nous recueillerons un courant

électrique ; si au contraire nous envoyons dans la machine un courant électrique à l'aide d'un appareil quelconque, une pile par exemple, nous dépenserons notre courant électrique, mais l'anneau se mettra en mouvement, la manivelle tournera et nous pourrons utiliser cette rotation et recueillir du travail. Les machines de ce genre peuvent donc être utilisées dans les deux sens, et cette propriété frappante a reçu le nom bien choisi de *réversibilité*.

On cite assez fréquemment, comme la première application importante de ce principe, l'expérience faite en 1873 à l'Exposition de Vienne avec la machine de Gramme. Une de ces machines était mise en mouvement par un moteur à vapeur ; elle envoyait son courant dans une autre machine semblable placée à environ 500 mètres, celle-ci se mettait en mouvement, et sa rotation était employée à faire fonctionner une pompe. Cette expérience est très intéressante, en effet, et on peut admettre que c'est la première où la réversibilité des machines fut employée à fournir un travail mécanique de quelque importance, mais elle n'est pas la première manifestation de ce principe si fécond. Il avait déjà été aperçu, notamment par MM. Siemens frères en 1867 ; mais avant eux encore il avait été énoncé avec beaucoup de clarté et de rigueur par M. Pacinotti. Ce savant éminent, venu avant son heure, avait, comme on l'a vu dans la première partie du livre, inventé vers 1861 et décrit en 1864, une machine où se trouvaient appliqués et très bien utilisés la plupart des principes et même quelques-unes des dispositions de détail qui, huit ou dix années après, firent le succès d'autres machines. L'attention publique n'était pas encore attirée de ce côté : l'invention de M. Pacinotti resta peu connue jusqu'au jour où l'Exposition d'électricité de 1881 vint la mettre en lumière et fit reconnaître le mérite de son inventeur, qu'un diplôme d'honneur récompensa justement. La machine de Pacinotti est représentée figure 43 ; on voit qu'il avait trouvé la disposition annulaire du

fil conducteur où se développe le courant et avait ainsi constitué l'organe mobile qu'on nomme aujourd'hui *anneau induit.* Deux électro-aimants E et E′ formaient, comme actuellement, l'organe nommé l'*inducteur;* enfin nous reproduisons ici la phrase déjà citée par laquelle se termine le mémoire où il décrit son appareil. « Ce modèle montre de plus comment la machine électro-magnétique est réciproque de la machine magnéto-électrique, puisque dans la première le courant électrique qui y a été introduit par les rhéophores, en circulant dans les bobines, permet d'obtenir le mouvement de la roue et son travail mécanique, tandis que dans la seconde on emploie un travail mécanique pour faire tourner la roue et obtenir, par l'effet de l'aimant permanent, un courant qui circule dans les bobines pour se transporter aux rhéophores et de là être amené dans le corps sur lequel il doit agir. »

C'est l'énoncé du principe de la réversibilité, et c'est le plus ancien que nous connaissions : l'honneur d'avoir clairement aperçu ce fait scientifique doit donc être attribué au savant italien. Ce point d'histoire a son intérêt, parce que le principe dont il s'agit est d'une grande importance. Il n'est pas en effet particulier aux machines électriques, c'est une propriété très générale, comme on l'a vu aussitôt que l'attention a été attirée de ce côté. Presque tous les phénomènes sont théoriquement réversibles ; en dépensant de la chaleur, on produit du mouvement : c'est ce que nous faisons dans les machines à vapeur par exemple. Mais chacun sait qu'en dépensant du mouvement on obtient de la chaleur : par exemple, si l'on frotte deux corps l'un sur l'autre, ils s'échaufferont, et le travail employé à les mettre en mouvement se retrouvera dans la chaleur produite ; les phénomènes sont si bien liés, qu'on a pu déterminer à quelle quantité de chaleur correspond un travail donné, c'est ce qu'on appelle l'équivalent mécanique de la chaleur. En

dépensant de la chaleur on peut produire certaines décompositions chimiques, mais si l'on peut reformer les corps dont les éléments ont été ainsi disjoints, leur recomposition rendra précisément la quantité de chaleur qui avait été nécessaire pour les séparer. La réversibilité est ainsi une propriété très générale; elle n'est pas toujours utilisable, mais les phénomènes électriques sont de ceux où l'on peut la manifester avec le plus de facilité et où elle est presque toujours susceptible d'applications. C'est parce que les machines à induction la possèdent au plus haut point, qu'elles sont devenues l'organe de la production et du transport du travail mécanique par l'électricité.

Une remarque importante doit être faite ici : dans l'origine, les moteurs électriques étaient de véritables producteurs de force; ils étaient mis en mouvement par le courant d'une pile électrique, on dépensait du zinc dans la batterie, on recueillait du travail sur le moteur. C'était un véritable développement d'énergie mécanique. Avec les machines à induction, nous pourrions sans doute faire de même; ce n'est pourtant pas ainsi que nous opérerons. Le courant de la pile étant cher et incommode à produire, nous demanderons l'électricité aux machines elles-mêmes, et celles-ci la produiront en dépensant du travail. Nous absorberons donc du travail pour en récupérer. On peut se demander au premier abord quelle est l'utilité d'une pareille opération. Elle réside dans le transport. Dans une multitude de cas faciles à supposer, le transport est de première importance. Combien de chutes d'eau par exemple aujourd'hui inutiles à cause de leur situation seraient précieuses si elles pouvaient être transportées près d'un centre populeux!... la somme des forces ainsi négligées est immense, et le transport électrique donnera le moyen de les ajouter au fond de la puissance humaine. Comptez aussi le nombre énorme des cas où la puissance doit être appliquée à des organes mobiles ou à des outils

dispersés; imaginez par exemple des grues le long d'un quai : il leur faudra à chacune un moteur spécial avec les moyens ordinaires : avec l'électricité, un moteur unique, sans être dérangé, enverra le mouvement à l'appareil qui devient utile. Une considération plus importante encore est celle de la division de la force. Comme on le verra plus loin, on a aujourd'hui l'espoir fondé que l'électricité permettra non seulement de transporter la force mais aussi de la diviser, de la distribuer. Nous ne voulons pas insister ici sur l'importance de ce point de vue qui sera étudié à part, nous voulons seulement l'indiquer pour montrer à quelles conséquences peut conduire le transport électrique de la force. D'ailleurs le lecteur se rendra compte de son importance en voyant dans les chapitres suivants se développer successivement les applications auxquelles il a déjà conduit.

II. — GÉNÉRALITÉS SUR LES NOUVEAUX MOTEURS

Pourquoi les machines à induction ou dynamo-électriques sont de meilleurs moteurs que les machines à aimantation. — Comment la force se transmet dans ces machines. — Le travail maximum. — Le rendement.

Sans avoir besoin de pénétrer plus avant dans le mode de fonctionnement des machines que nous considérons, nous pouvons immédiatement voir pourquoi ces appareils ont donné le succès jusque-là vainement cherché et d'où vient leur supériorité sur celles qui avaient été essayées jusque-là et qui ont été décrites dans la première partie de ce volume. Nous avons déjà touché cette question dans cette première partie, mais il n'est pas inutile d'y revenir encore. Dans les anciennes machines on produisait le mouvement en aimantant une ou plusieurs masses de fer et en leur faisant attirer des armatures mobiles dont le

déplacement produisait le travail mécanique; il fallait naturellement que les masses aimantées cessassent leur action une fois l'attraction produite, pour la recommencer ensuite afin de donner une impulsion nouvelle. Ce moyen a trois graves défauts : 1° les actions magnétiques s'affaiblissent très rapidement avec la distance, en sorte que les attractions d'un aimant n'ayant de puissance que dans un rayon très petit, les impulsions obtenues ne pouvaient être énergiques que dans une très petite partie du mouvement; 2° le mouvement ainsi obtenu ne résultait pas d'une action continue mais d'une série d'à-coups successifs, ce qui est un moyen mécanique toujours défectueux d'obtenir le travail; 3° enfin, et c'est là l'inconvénient le plus grave, l'aimantation et la désaimantation de masses de fer de quelque importance ne peuvent être opérées instantanément, elles demandent un temps très court sans doute mais cependant appréciable; de plus ces alternatives ne se font pas sans une perte notable d'énergie. Une expérience facile à répéter en donne la preuve. Si l'on aimante et désaimante rapidement un grand nombre de fois un électro-aimant, son noyau s'échauffe sensiblement; cette chaleur représente autant de travail, c'est de l'énergie qui se perd dans les mouvements magnétiques successivement imprimés à la masse de fer; encore l'expression est-elle fausse, car il n'y a jamais d'énergie perdue, il n'y a que des transformations; seulement ici une part de l'énergie au lieu d'être employée à fournir les aimantations qu'on lui demandait, s'emploie à fournir de la chaleur qu'on ne lui demandait pas, ce qui constitue pour nous une perte dans le travail utile recueilli.

Ces trois inconvénients sont évités, comme on s'en rend compte aisément, dans les machines reposant sur l'induction. Dans les appareils de ce genre : 1° les distances d'action sont réduites au minimum, les fils induits pouvant tourner à une distance très faible des pôles magné-

tiques; 2° l'action, bien que non absolument continue théoriquement, est composée d'une série si rapide d'impulsions successives qu'elle est pratiquement continue; 3° enfin l'aimant produisant le champ magnétique qui fait naître l'induction demeure toujours dans le même état et n'a point à subir d'alternatives, ce qui permet de pousser l'aimantation à des intensités dont les anciennes machines devaient rester bien éloignées, cela dit sans parler d'autres avantages que possèdent ces machines.

Cette supériorité reconnue, il nous faut maintenant examiner d'un peu plus près comment les machines dynamo-électriques transportent la force et produisent le travail.

Rappelons d'abord quelques notions générales.

Lorsqu'on examine une source d'électricité quelconque destinée à produire un courant, le premier élément à connaître est ce qu'on nomme la *force électromotrice*, c'est-à-dire la puissance avec laquelle cette source tend à lancer l'électricité. D'une façon analogue, si l'on veut connaître la valeur mécanique d'une chute d'eau, il faudra d'abord connaître la hauteur de cette chute, la pression que sa colonne d'eau est capable d'exercer; de même encore, si l'on veut évaluer le travail à retirer d'une chaudière à vapeur, il conviendra de savoir avant tout à quelle tension la vapeur y est portée. Ces éléments relatifs à des producteurs d'énergie si différents sont cependant si bien assimilables que, pour l'électricité, on emploie l'un pour l'autre les termes de *force électromotrice*, *tension* ou *pression*. Nous en faisons usage à peu près indifféremment.

Lorsqu'il s'agit d'une pile électrique, une fois l'appareil installé, la force électromotrice est déterminée, elle dépend de la nature de la pile, du nombre de ses éléments et de leur disposition. Dans les machines génératrices la force électromotrice dépend de la construction de la machine, mais elle est également liée à la vitesse

de rotation et va en croissant avec elle. On ne peut donc déterminer cette force, pour une machine donnée, qu'en déterminant en même temps la vitesse donnée à la machine. Ces éléments ne sont pas d'ailleurs suffisants, la force électromotrice de la machine étant liée également à d'autres conditions dépendant des circonstances extérieures.

La force électromotrice d'un générateur électrique étant connue, le courant qu'il fournira dans chaque circonstance dépend du circuit où on le fera circuler ; de même qu'une chute d'eau fournira un débit dépendant de sa hauteur d'abord et ensuite du diamètre et de la longueur des tuyaux à parcourir, de même une source électrique donnera un courant dont l'intensité sera en raison de sa force électromotrice et de la résistance du circuit à parcourir. On ne doit jamais oublier que dans ce circuit il faut compter non seulement les fils et les appareils extérieurs au générateur, mais aussi ce générateur lui-même, car le courant le traverse comme le reste, et la résistance qu'il oppose au passage de l'électricité est un élément toujours nécessaire, quelquefois très important.

Rappelons enfin que ces trois éléments, la force électromotrice E, l'intensité du courant I, la résistance totale du circuit R sont liés par une relation très simple qui s'écrit ainsi : $I = \frac{E}{R}$, ces éléments étant comptés avec les unités électriques adoptées par le récent congrès d'Électricité, c'est-à-dire E en *volts*, du nom de Volta ; R en *Ohms*, du nom du savant qui a donné la formule ci-dessus ; enfin, I en *ampères*, nom dont l'origine n'a pas besoin d'être expliquée en France.

Venons aux machines. Prenons pour exemple une machine Gramme, du type usuel représenté ci-dessus (fig. 67) et que l'on nomme type d'atelier. Nous la mettons en relation avec un moteur, une machine à vapeur par exemple, et la voici qui tourne ; nous lui imprimerons une vitesse déterminée et constante, soit 1000 tours

par minute. D'abord nous ne placerons aucun fil conducteur entre les bornes d'attache de la machine, le circuit sera ouvert : dans ces conditions, naturellement, pas de courant, mais aussi, pas de travail à dépenser pour faire marcher la machine. A vrai dire, il en faut un peu à cause des frottements, mais c'est peu de chose, et nous pouvons n'en pas tenir compte. Mettons maintenant entre les deux bobines un fil conducteur assez long, 50 mètres de fil télégraphique, par exemple, et en même temps, un appareil qui puisse mesurer l'intensité des courants. Il nous signalera un courant très faible, et la machine à vapeur commencera à fournir un peu de travail; diminuons la longueur du fil, nous verrons le courant augmenter, avec lui le travail fourni par la machine à vapeur, et ces deux quantités iront ainsi toujours croissant à mesure que la résistance du circuit diminuera. On se demandera immédiatement ce que devient dans cette expérience le travail produit par la machine à vapeur : on le verra bien vite si l'on pousse l'expérience trop loin; le circuit métallique, la machine électrique elle-même, s'échaufferont énergiquement, et l'appareil pourra fort bien brûler si l'on opère sans prudence; le travail s'est converti en chaleur.

Maintenant, au lieu de ce circuit formé simplement d'un fil conducteur, mettons en relation avec notre machine une deuxième machine pareille à elle-même, en laissant dans le système notre appareil à mesurer les courants. Pour commencer, nous allons fixer notre deuxième machine de façon qu'elle ne puisse pas tourner. Nous observerons alors un courant énergique, et la machine à vapeur dépensera un travail considérable; notre nouvelle machine n'agit là que comme un fil conducteur, et comme elle a peu de résistance, les actions produites sont intenses. Il serait même difficile de réaliser l'expérience, ou au moins de lui donner quelque durée; les deux appareils seraient en grand danger de brûler, tout

le travail du moteur étant transformé en chaleur; nous n'en recueillons aucune partie, en effet, puisque notre nouvelle machine est maintenue immobile.

Faisons le contraire; supprimons l'obstacle qui l'arrêtait, laissons-la libre, complètement libre. Voici alors ce que nous observons : la machine entre immédiatement en mouvement, et sa rotation s'accélère très rapidement; en même temps, l'appareil mesureur du courant, le galvanomètre, montre que le courant décroît très rapidement; au bout d'un instant ce courant devient et reste complètement nul; à ce moment, si l'on observe la vitesse de la deuxième machine, on voit qu'elle est précisément égale à celle de la première. La machine à vapeur ne fournit plus alors aucun travail, les choses sont comme si la première machine tournait à circuit ouvert; n'oublions pas que, dans ces conditions, la deuxième machine ne fournit non plus aucun travail.

Que s'est-il passé? Pour le comprendre, rappelons-nous qu'une machine dynamo-électrique qui tourne avec un circuit fermé, produit toujours un courant électrique. Donc, lorsque notre deuxième machine est entrée en mouvement, elle a commencé à produire un courant. Si nous regardons avec attention la marche de l'ensemble, nous verrons immédiatement que ce courant serait de direction opposée à celui qu'elle reçoit; les deux machines tendent donc à lancer dans le même circuit deux courants contraires; ils se détruisent mutuellement, et il ne reste d'apparent que la différence de ces deux actions; or quand les deux machines sont arrivées à tourner avec la même vitesse, les deux courants qui tendent à naître sont égaux, et ils se détruisent donc complètement; en réalité il n'y a plus de circulation électrique dans le circuit, les machines tournent comme à circuit ouvert.

Imposons enfin un travail à notre deuxième machine; donnons-lui par exemple à monter un poids. Les fonctions des deux appareils en circuit deviennent alors bien dis-

tinctes, la première machine engendre l'électricité, ce sera la *génératrice*; l'autre nous fournit un travail, ce sera la *motrice*. On voit immédiatement ce qui va arriver; la machine motrice ayant un travail à faire, sera ralentie; elle ne pourra conserver une vitesse égale à celle de la machine génératrice. Dès lors, le contre-courant qu'elle donne ne sera plus égal au courant direct; celui-ci cessera d'être contre-balancé, un courant résultant de la différence circulera dans le système et sera signalé par le galvanomètre; et, remarquez-le bien, si l'effort imposé à la machine motrice est petit, elle sera peu ralentie; la différence entre les vitesses des deux machines, et par suite entre les courants opposés, sera faible, le courant résultant sera donc peu marqué. Si au contraire l'effort est grand, le ralentissement sera considérable, et la grande différence des forces électromotrices donnera lieu à un courant résultant énergique, en sorte qu'il y a une relation nécessaire entre l'effort imposé à la machine motrice et le courant circulant dans le circuit. En augmentant toujours cet effort, nous ralentirons de plus en plus la machine motrice, le courant ira toujours en augmentant, et nous reviendrons enfin au point d'où nous étions partis; la machine motrice trop chargée finira par s'arrêter, et le courant atteindra la valeur maximum que nous lui avons vu prendre dans la première expérience.

Dans tout cela, quel travail avons-nous recueilli? A l'origine la machine motrice étant libre nous n'avions rien; à la fin, la machine étant chargée jusqu'à s'arrêter, nous n'avons rien non plus. Cela se conçoit, le travail recueilli dépend en effet de deux éléments: 1° de l'effort et du travail accompli à chaque tour; 2° du nombre de ces tours; or, en augmentant l'effort et le travail par tour on ralentit la machine, c'est-à-dire qu'on diminue le nombre des tours; notre travail total est donc un produit de deux facteurs dont l'un augmente quand l'autre diminue. Il doit avoir un maximum. Il en a un, en effet, qui a lieu

lorsque la vitesse de la machine motrice est égale à la moitié de celle de la machine génératrice; on recueille alors sur la seconde machine la moitié du travail dépensé sur la première, et on obtient d'elle le plus grand travail qu'elle puisse fournir.

Ceci nous amène à une considération importante. Nous voyons que le travail recueilli n'est jamais égal au travail dépensé, il y a toujours une perte; la proportion entre les deux travaux, en termes précis, le rapport du travail recueilli au travail dépensé donne la mesure de cette perte. C'est ce qu'on nomme *le rendement*. Il ne peut pas être égal à 1, et nous venons de voir que dans le cas où l'on cherche à obtenir le travail maximum, il descend à $\frac{1}{2}$. Cette proportion n'est pas nécessaire; en n'exigeant pas des appareils le plus haut travail qu'ils puissent fournir, on en obtient une somme moindre, il est vrai, mais on l'obtient à meilleur compte, c'est-à-dire avec un rendement plus avantageux. On voit comment on sera conduit à opérer lorsque les applications pratiques prendront de l'importance, époque certainement très prochaine, mais où nous ne faisons que d'entrer. Supposons qu'on veuille transporter électriquement et recueillir au point d'arrivée un travail de cinq chevaux vapeur par exemple : on pourra employer comme génératrice une machine pouvant absorber un travail de 10 chevaux; une machine pareille employée à l'arrivée dans ses conditions de maximum, fournira les 5 chevaux demandés, on aura un rendement égal à $\frac{1}{2}$; mais on pourrait employer comme génératrice une machine plus puissante, à force électromotrice plus élevée, capable par exemple d'absorber un travail de 15 chevaux. Une machine semblable employée comme motrice à l'arrivée fournira les 5 chevaux en ne demandant qu'un travail dépensé de 8 chevaux par exemple (il est bien entendu que ces chiffres n'ont rien de précis et ne sont donnés que pour fixer les idées), et cela parce que n'étant pas poussée jusqu'à son travail maximum,

elle sera susceptible de donner un rendement plus avantageux. Il est bien vrai qu'une disposition de ce genre demandera une première dépense plus considérable, mais en échange elle entraînera une dépense journalière moins élevée. Le cas n'a rien d'exceptionnel; comment fait-on dans les machines à vapeur pour user peu de charbon pour un travail donné? On emploie des machines à détente, or, chacun sait que les machines à détente pourraient fournir beaucoup plus de force qu'elles ne le font si on y employait la vapeur à pleine pression; on ne leur demande pas tout ce qu'elles peuvent faire afin d'obtenir le résultat dans de meilleures conditions; on augmente le capital de premier établissement pour diminuer la dépense d'exploitation. On sera certainement conduit à faire de même dans l'emploi mécanique des machines électriques, afin d'améliorer leur rendement; au reste nous aurons à revenir sur ce point.

Avant de quitter nos deux machines, nous ferons encore une expérience. Tout à l'heure, la génératrice restant toujours dans les mêmes conditions de vitesse, nous avons imposé à la réceptrice des efforts toujours croissants, et nous avons vu le courant produit dans le circuit prendre une série de valeurs croissant depuis zéro jusqu'à la plus grande que permette la résistance du circuit. Nous allons maintenant faire l'inverse. La machine réceptrice aura à supporter un effort constant, à chaque tour elle fera le même travail, quant à sa génératrice, nous la mettrons en mouvement en partant d'une vitesse nulle et nous accélérerons peu à peu cette vitesse autant que possible. Bien entendu nous laissons dans le circuit le galvanomètre indiquant l'intensité du courant qui nous a déjà servi.

Voici alors ce qui se passe : la génératrice tournant très lentement, un courant très faible se manifeste, la réceptrice ne bouge pas. A mesure que la vitesse augmente, le courant augmente; pour une certaine valeur I

de ce courant, la machine réceptrice entre en rotation. A partir de ce moment, bien que la vitesse de la génératrice s'accroisse, le courant n'augmente plus, seulement la vitesse de la machine réceptrice s'accroît en même temps que celle de l'autre appareil et de la même quan tité. Pour le travail recueilli, il va naturellement en croissant avec la vitesse de la machine réceptrice.

On voit ce qui a lieu : tant que le courant produit n'est pas assez fort pour vaincre l'effort imposé à la machine réceptrice, celle-ci ne peut bouger, elle figure donc dans le circuit seulement comme une résistance inerte. Au moment où le courant devient juste assez puissant pour vaincre cet effort, elle commence à tourner, et en même temps elle commence à produire une force contre-électro-motrice propre à diminuer le courant qu'elle reçoit. Si ce courant a tendance à s'accroître, il deviendra trop fort pour l'effort à vaincre, il fera donc marcher la machine plus vite; mais alors, la force contre-électro-motrice de la machine s'accroîtra également, jusqu'à ce que l'accroissement du courant soit exactement contre-balancé et que sa valeur soit revenue à celle qui est justement correspondante à l'effort à vaincre.

On peut manifester cette loi autrement, en donnant à la génératrice une vitesse constante, imposant une charge constante à la réceptrice, mais en faisant varier les résistances interposées entre elles; on arrive également à trouver une valeur du courant qui ne peut être modifiée quelles que soient les résistances, à condition que la machine réceptrice soit capable de tourner; sa vitesse seule varie.

Nous retrouvons ainsi ce fait déjà signalé, à savoir qu'il y a une relation nécessaire entre l'effort imposé à une machine et le courant qu'elle reçoit, mais nous pouvons le compléter par cette remarque importante que cette relation est absolument indépendante de la vitesse, et s'impose quel que soit l'état de mouvement de la machine.

Cette loi est d'une importance fondamentale, et nous aurons à la rappeler dans le cours de ces études rapides.

III. — LES NOUVEAUX PETITS MOTEURS

Pourquoi on place ici les petits moteurs. — Pourquoi il y a des formes spéciales de petits moteurs. — Quelques types.

Après avoir examiné rapidement la nature des machines qui vont nous servir à transmettre la force, après nous être sommairement rendu compte de leur mode de fonctionnement, il serait naturel de suivre la série des expériences par lesquelles on a été amené aux résultats réalisés jusqu'ici et on a été conduit aux formes de machines que l'on va mettre en usage.

C'est en effet la méthode que nous suivrons, mais avant d'entrer dans cet ordre d'idées, il est nécessaire de traiter une fois pour toutes un sujet accessoire qui viendrait embarrasser le développement logique de cette histoire. Parallèlement aux machines destinées à transmettre des forces importantes, nous rencontrons, en effet, un groupe d'appareils destinés à produire et à transmettre seulement de petites forces, c'est-à-dire des travaux inférieurs à une limite de 10 kilogrammètres par seconde environ. Bien que leur invention soit postérieure à celle des grands appareils, on peut les rattacher aux appareils plus anciens; ceux-ci, comme nous l'avons vu, étaient des moteurs susceptibles de grande précision, mais capables seulement de faibles travaux : les moteurs dont nous allons parler sont dans des conditions analogues. Ils reprendront les applications auxquelles les anciens s'étaient montrés propres, mais en élargissant énormément leur champ. Il sera donc à propos d'étudier ici d'abord et d'un seul coup cette famille d'appareils.

Une question se pose immédiatement. D'où vient qu'il

y a des petits moteurs spéciaux et pourquoi ne suffit-il pas de faire des machines des types ordinaires mais de dimensions réduites? C'est que cette construction serait fort difficile et coûteuse. Les machines dynamo-électriques contiennent des parties d'une disposition délicate parmi lesquelles il faut citer les enroulements de fils qui constituent les anneaux ou bobines tournantes, c'est-à-dire l'organe où se développent les courants induits. Au-dessous de certaines dimensions, la construction de ces organes serait presque impossible. De plus, ces machines renferment des parties qui, dans les grands types, sont déjà assez petites; elles deviendraient microscopiques dans des types très réduits. Il existe aussi des raisons électriques, c'est-à-dire que la réduction proportionnelle d'une grande machine engendrerait en tournant, ou au



Fig. 69. — Bobine de M. Siemens.

contraire demanderait pour tourner des courants dans des conditions peu convenables. De tout cela il résulte qu'un petit moteur électrique doit être un appareil différent des grands moteurs.

Le plus ancien de ces moteurs, celui qui a donné le type de presque tous les autres, est celui de M. Marcel Deprez.

Il existait depuis 1854 une bobine particulière due à M. Siemens, dont nous donnons ci-dessus le dessin (fig. 69); elle se compose, comme on le voit, d'un cylindre en fer doux sur lequel des fils sont enroulés, mais dans le sens de la longueur. Pour cela on a creusé dans le cylindre deux rainures longitudinales dans lesquelles les spires du fil sont couchées. Lorsque ces spires sont parcourues par un courant, la bobine devient un aimant

qui présente deux longues faces polaires, et la position de ces pôles change avec le sens du courant. M. Siemens, avec cette bobine et des aimants permanents, avait constitué un générateur magnéto-électrique. Nous avons dit que cette bobine fut employée dans un assez grand nombre de machines, entre autres les machines de Wilde et de Ladd.

M. Marcel Deprez démontra le premier que ces machines étaient réversibles et pouvaient donner de bons électromoteurs. Il n'est pas impossible que ce fait ait été vaguement aperçu par quelques personnes, particulièrement par MM. Siemens, mais ils n'en virent pas l'importance. Or, c'est un fait que le lecteur connaît, mais qu'on ne doit jamais oublier; l'inventeur n'est pas celui qui le premier entrevoit un phénomène, mais bien celui qui en reconnaît la valeur et en tire parti: presque tous les faits scientifiques ont été vus et même signalés avant l'heure où ils sont mis en œuvre; celui qui les retrouve à nouveau et en fait sortir une machine, n'en est pas moins absolument l'inventeur.

Au reste la machine de Ladd, telle qu'elle était, eût fourni un mauvais moteur. M. Marcel Deprez la modifia; il fit disparaître les épanouissements métalliques qui agrandissaient les pôles des aimants et rectifia la position, ce qu'on nomme proprement le *calage des frotteurs*, qui donne lieu aux changements de sens du courant, et arriva à la forme représentée figure 70.

On comprend comment une pareille machine fonctionne. Lorsqu'un courant extérieur y est lancé, il fait naître des pôles magnétiques dans les lames de fer doux en BB et aussi dans les joues de la bobine tournante A. On s'arrange pour que chacun des pôles B repousse le pôle de la bobine qui lui fait face, celle-ci se met alors en mouvement; lorsqu'elle a fait un demi-tour, les frotteurs C, C, qui amènent le courant, étant restés immobiles tandis que la bobine tourne, s'appuient sur elle dans la position

inverse; le courant y pénètre dans le sens inverse, et les pôles sont renversés. La répulsion va donc se renouveler dans la position nouvelle, et la bobine continuera à tourner. On peut recueillir le mouvement soit sur la roue G, soit sur l'une des roues K ou F, suivant la vitesse que l'on veut avoir.

Ce type de machines n'est pas celui auquel M. Marcel Deprez s'est arrêté; il a cru meilleur de faire usage d'ai-

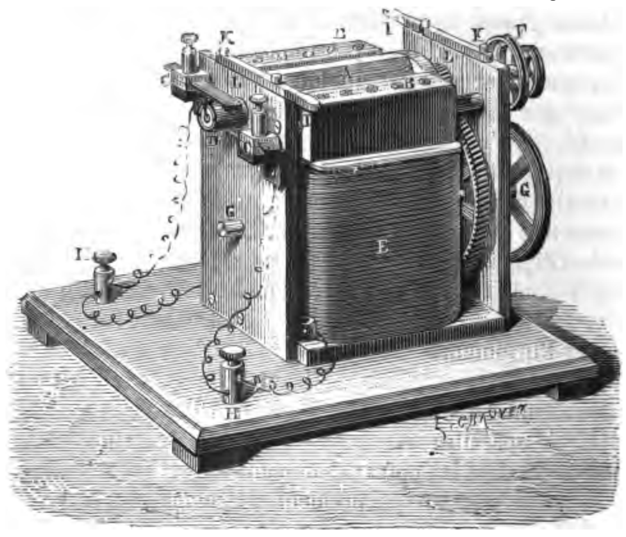


Fig. 70. — Premier moteur de M. Deprez.

mants permanents, se rapprochant ainsi de la première disposition adoptée par M. Siemens; mais il a donné à la machine une disposition nouvelle en couchant la bobine parallèlement entre les branches d'un aimant en fer à cheval. Tout le magnétisme de l'aimant est alors utilisé d'une manière très complète.

L'appareil a la forme représentée figure 71. Le courant y pénètre par les deux petits balais frotteurs que l'on

voit à droite. Dans la disposition figurée, l'appareil porte une roue à gorge, permettant d'en faire un moteur, et une manivelle qui permet de l'employer comme générateur. Le poids de l'appareil ne dépasse pas 4 à 5 kilogrammes.

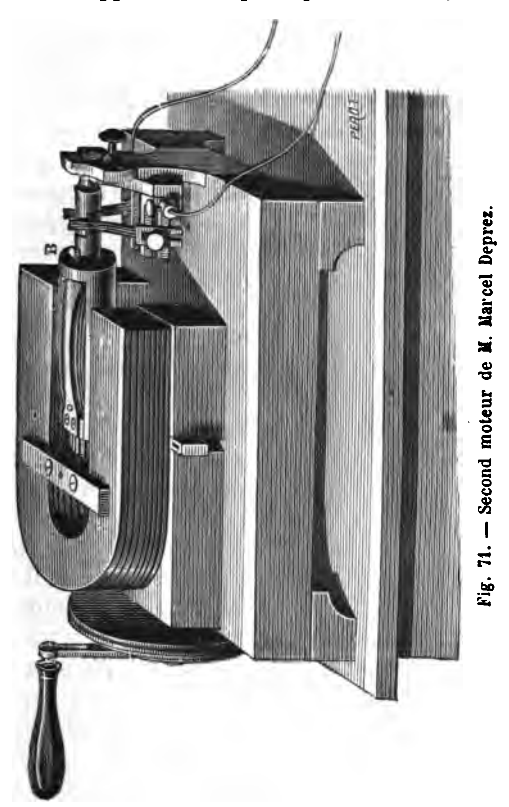


Fig. 71. — Second moteur de M. Marcel Deprez.

Ayant considéré que dans la machine de Ladd transformée en moteur, la création du champ magnétique dans laquelle tourne la bobine de Siemens entraîne une dépense d'énergie représentant environ le tiers de celle

absorbée par le moteur tout entier, M. Marcel Deprez en avait conclu, ainsi que nous venons de le dire, qu'il y aurait avantage à supprimer l'électro-aimant fixe et à le remplacer par un aimant permanent. Des mesures dynamométriques accompagnées de mesures de consommation de zinc, prises comparativement sur un moteur où le champ magnétique était constitué par un électro-aimant et sur un autre où il était remplacé par un aimant permanent, lui montrèrent qu'en effet, dans le premier cas, le travail mécanique correspondant à la dissolution d'un kilogramme de zinc était de 70 000 à 90 000 kilogrammètres, tandis qu'il variait de 90 000 à 130 000 kilogrammètres dans le second cas. Le moteur à aimant permanent présentait en outre l'avantage de pouvoir servir de machine génératrice, mais, en revanche, il exigeait des appareils assez lourds relativement au travail produit. La pratique révéla d'ailleurs un assez grave inconvénient; l'aimant se désaimantait assez promptement, et pour l'éviter, M. Deprez dut revenir à la disposition primitive, mais en disposant les organes avec des dimensions très réduites et d'une autre manière. Ils n'occupent en effet, dans le nouveau modèle qu'il a fait construire, qu'un espace de 6 centimètres de largeur sur 7 centimètres de longueur, et le système électro-magnétique est double. Il se compose de deux petits électro-aimants de 3 centimètres de longueur de branches, opposés l'un à l'autre par des pôles de noms contraires, et entre ces pôles se trouvent les bobines Siemens dont la longueur ne dépasse pas 2 centimètres, et le diamètre 16 millimètres. Elles sont montées sur un même axe horizontal et sont disposées à angle droit, l'une par rapport à l'autre, c'est-à-dire que quand les pôles de l'une sont entre les pôles de l'électro-aimant correspondant, les pôles de l'autre sont dirigés suivant la ligne équatoriale ou perpendiculaire. Comme ce moteur tourne toujours très vite, on en a diminué la vitesse sur l'arbre de travail, dans le rapport de 1 à

10 au moyen d'un pignon et d'une roue dentée. Le commutateur et les communications électriques sont d'ailleurs établis de façon à permettre de lancer dans les électro-aimants fixes et dans les deux bobines tournantes, trois courants distincts. Comme ce sont les culasses des électro-aimants qui forment le bâti du systéme, on voit que l'ap-

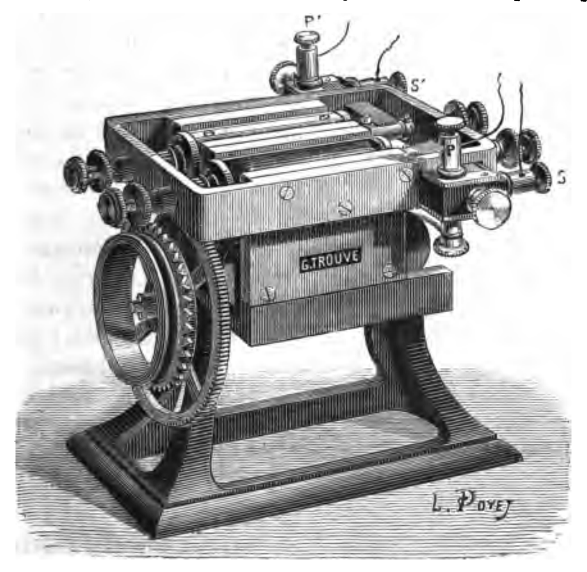


Fig. 72. — Dernier moteur de M. Trouvé.

pareil est dans de très bonnes conditions pour fournir le plus de force possible avec le moindre poids de fer.

Après les moteurs précédents, vient, par ordre chronologique, celui de M. Trouvé. Il se rapproche du moteur Ladd-Deprez que nous avons décrit ci-dessus, comme on le voit par la figure 72; c'est donc un moteur dynamo-électrique. Il présente cependant des modifications intéressantes. Celle à laquelle M. Trouvé attache le plus d'importance est une déformation donnée à la bobine,

La bobine Siemens, employée par M. Marcel Deprez, est cylindrique; elle reste donc toujours à la même distance des pôles; celle de M. Trouvé offre un profil transversal représentant deux demi-spirales, en sorte que dans sa rotation, le fer s'approche peu à peu du pôle magnétique pour s'en éloigner ensuite brusquement au moment de l'inversion des courants. C'est du reste une disposition analogue à celle qu'il avait déjà combinée et que nous avons décrite page 109. M. Trouvé pense éviter ainsi un inconvénient particulier. Il est nécessaire dans les moteurs précédents de lancer la bobine ou au moins de la déplacer pour que le mouvement prenne naissance; sans cela les pôles se trouvant exactement en face les uns des autres, l'appareil est, comme on dit, « au point mort » et ne part pas. La disposition dissymétrique de M. Trouvé permet d'atténuer ce défaut. La forme héliçoïdale de la bobine est d'ailleurs très peu marquée, et une déformation de 1 mm. suffit à obtenir l'effet cherché. On peut remarquer aussi que l'enroulement des électro-aimants a une forme particulière; au lieu d'enrouler le fil autour des deux branches, comme dans la machine Ladd-Deprez, il n'y a qu'un enroulement sur la culasse de fer doux qui réunit ces deux branches. La dimension de l'appareil est ainsi réduite.

Des expériences de M. d'Arsonval conduisent à conclure que le rendement utile de cet appareil est inférieur à celui du moteur magnétique Deprez, c'est-à-dire que le kilogrammètre de force y est obtenu à un prix plus élevé. En échange, il est juste de reconnaître que sous un même poids cet appareil peut fournir plus de travail que le précédent.

On peut citer à la suite des appareils précédents un petit moteur qui en diffère très peu, celui de M. Cloris Baudet. Il se compose de deux bobines Siemens placées l'une au bout de l'autre et dont les âmes en fer sont fixées à angle droit de façon à éviter le point mort; deux

électro-aimants droits embrassent ce couple de bobines et lui donnent le mouvement. Le moteur a la forme indiquée figures 73 et 74. On pourrait assimiler ce moteur à deux appareils Ladd-Deprez ou Trouvé placés bout à bout. Il n'en diffère que par la disposition de la bobine dont l'âme, au lieu d'être formée par une lame unique, est composée d'une série de petits noyaux ayant chacun leur enroulement. En sorte que cet organe, au lieu d'être simple, peut être considéré comme une série de petits électro-aimants juxtaposés et dont les pôles sont réunis par une seule lame, comme on le voit figure 75.

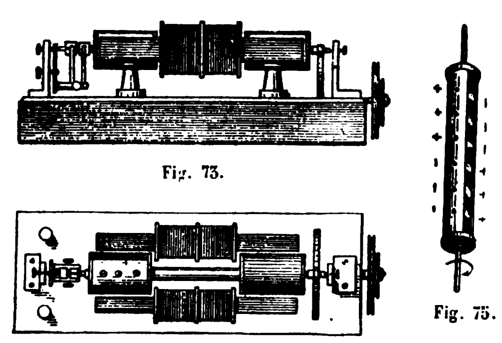


Fig. 73.

Fig. 74. — Moteur Cloris Baudet.

Fig. 75.

Les figures 73 et 74 montrent la disposition d'ensemble; comme on le voit les électro-aimants sont droits et portent leurs bobines magnétisantes vers le milieu de leur longueur; les bobines induites tournent entre des lames formant prolongement des pôles magnétiques. Ce petit moteur n'a en somme rien de bien original et a reçu peu d'applications.

Comme on le voit, dans ces petits moteurs, les inventeurs ont tenu compte de l'une des conditions nécessaires que nous avons signalées plus haut : la grande masse de fer doux a une aimantation invariable, les alternatives

magnétiques ne portent que sur la bobine, qui est d'une masse très faible; joignez à cela la vitesse très grande que prennent ces moteurs (3000 tours environ par minute) et qui semble une des conditions nécessaires de tous les moteurs électriques, et on comprendra leurs avantages.

Il est intéressant de citer une forme de moteur que M. Marcel Deprez avait indiquée comme étude. Elle est représentée figure 76. Elle comprend une bobine du genre Siemens C très courte, et, contrairement aux appareils

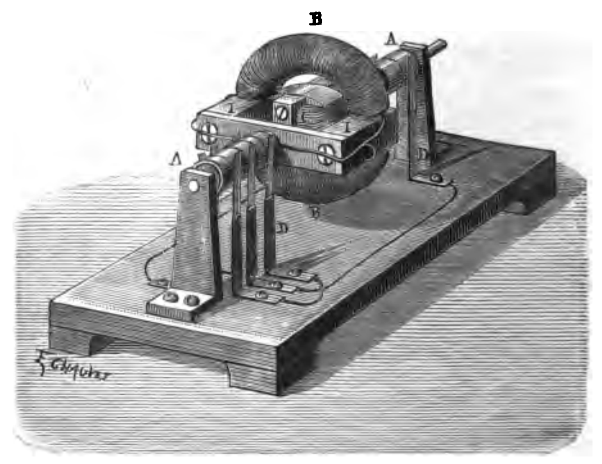


Fig. 76. — Troisième moteur de M. Marcel Deprez.

précédents, cette bobine est fixe. Elle est entourée d'un cercle de fer BB portant deux enroulements de fil sur ses deux moitiés. Lorsque le courant passe, il se forme sur un diamètre de l'anneau et dans la bobine des pôles magnétiques qui se repoussent. Or, si la bobine est fixe, l'anneau est mobile et il se met immédiatement à tourner; les frotteurs qui amènent le courant étant fixes comme toujours, les courants changent de sens à chaque demi-tour, et la rotation se continue.

Ici on manque aux principes; c'est dans la plus grande

masse de fer que les alternatives magnétiques ont lieu: aussi ce moteur est-il très inférieur aux précédents. Nous l'avons cité cependant à cause de la singularité de sa forme et de l'analogie qu'il présente avec d'autres appareils, particulièrement avec un moteur américain qui fut remarqué à l'Exposition de 1881. Il était dû à M. Griscom. C'est encore un moteur dynamo-électrique.

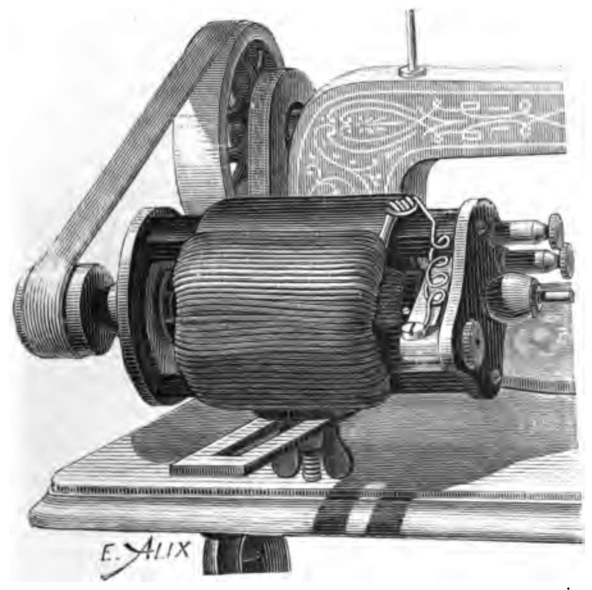


Fig. 77. — Moteur de M. Griscom.

Il se compose toujours d'une bobine Siemens, mais comme on le voit dans les figures 77 et 78, cette bobine est entourée d'une sorte d'anneau cylindrique creux en fer doux ou plus exactement en fonte malléable. Cet anneau est recouvert d'enroulements de fil le divisant en deux moitiés et combinés de manière à créer deux pôles conséquents aux deux extrémités d'un même diamètre vertical.

Quand l'axe de la bobine arrive à peu près à coïncider avec la ligne NS des pôles conséquents, le courant se renverse; il se produit une répulsion en N et une attraction S, ce qui fait pirouetter l'électro-aimant mobile d'un côté ou de l'autre, suivant que l'inversion se fait à gauche ou à droite de NS. Comme on le voit, ce moteur se rap-

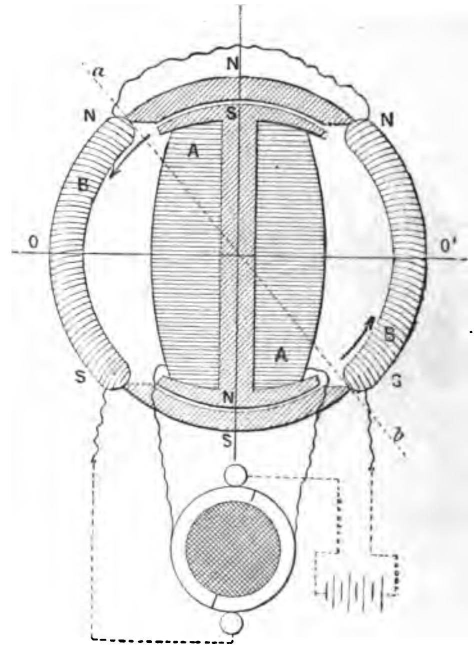


Fig. 78. — Coupe verticale du moteur Griscom.

proche jusqu'à un certain point de la disposition reconnue défectueuse par M. Marcel Deprez, et qui a été rappelée plus haut; seulement ici c'est la bobine qui tourne tandis que l'anneau est fixe. Nous sommes dans des conditions conformes à la théorie, aussi ce moteur donne-t-il des résultats satisfaisants. Il est très petit et léger, sa vitesse

est fort grande. On n'a pas de renseignements précis sur son rendement.

Comme on le voit, tous ces moteurs partent de la bobine Siemens. Ce ne sont donc pas des moteurs à induction, mais des moteurs à aimantations successives, ils se rapprochent par là de ceux qui ont été décrits dans la première partie de cet ouvrage.

Il nous reste à dire un mot de deux autres types de petits

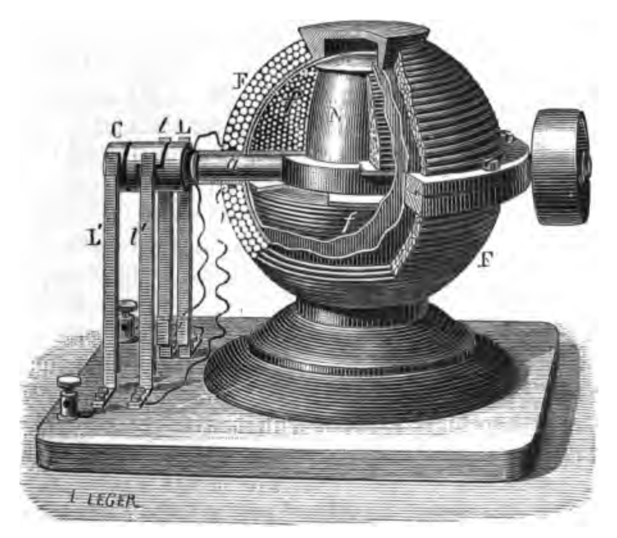


Fig. 79. — Moteur sphérique de M. Bürgin.

moteurs. On sait que si l'on place une aiguille aimantée mobile dans un cadre couvert de fil conducteur, un courant lancé dans ce fil fera tourner l'aiguille jusqu'à une position déterminée en croix avec le fil; c'est une réaction de courants croisés; si à ce moment on renverse le courant dans le cadre, l'aiguille reviendra à sa position primitive en continuant son tour, du moins si le changement a eu lieu à propos. On pourra ainsi obtenir une

rotation continue et un travail. Il n'est pas nécessaire d'ailleurs que l'organe aimanté soit un aimant permanent, il peut être un électro-aimant.

C'est sur ce principe qu'est fondé le petit moteur sphérique de M. Bürgin que nous représentons figure 79. Au lieu du cadre galvanométrique il a pris une sphère couverte de fil formant une série de spires presque suivant des parallèles horizontaux. A l'intérieur un noyau de fer mobile sur un axe horizontal est également entouré de spires formant encore des couches parallèles. Lorsqu'on lance le courant, ces deux séries de spires tendent à se mettre parallèles, et si on renverse le courant au moment où, dans la rotation, cette position est atteinte, le mouvement continue. On voit qu'ici n'y a plus d'aimantation variable, la partie de l'appareil où les courants sont renversés ne renferme que du fil conducteur. Il y a donc là un principe curieux et différent des autres. On perd, il est vrai, dans ce procédé, l'action énergique exercée par le magnétisme du fer doux. La forme sphérique adoptée par M. Bürgin est assez singulière, elle doit rendre les enroulements difficiles; elle donne à la machine un aspect très étrange, on ne voit qu'une boîte close d'où sort un axe animé d'un mouvement très rapide. Le moteur est un peu plus lourd que le précédent. On n'a pas non plus de notions sur son rendement.

Tout récemment M. Jablochkoff a combiné aussi un petit moteur qu'il désigne sous le nom *d'écliptique* et que nous représentons figure 80. La partie mobile est formée par une bobine plate *b* placée obliquement sur l'axe de rotation. Cette bobine est en fer, et l'ensemble forme ainsi un court électro-aimant. La partie fixe est une bobine plus grande B à cadre de cuivre, disposée obliquement à l'axe comme la première, mais dans le sens opposé. L'arrangement du commutateur est tel que le courant parcourt la bobine mobile toujours dans le même sens et que les changements de sens à chaque demi-révo-

lution aient lieu seulement dans le solénoïde fixe. Les actions de courants croisés qui s'exercent entre ce dernier et l'armature, produisent la rotation de celle-ci. Ce moteur a évidemment, comme le précédent, une forme très originaleet montre qu'on cherche aujourd'hui à appliquer aux moteurs toutes les réactions dynamiques des courants. Il a, du reste, les mêmes inconvénients que l'autre; les

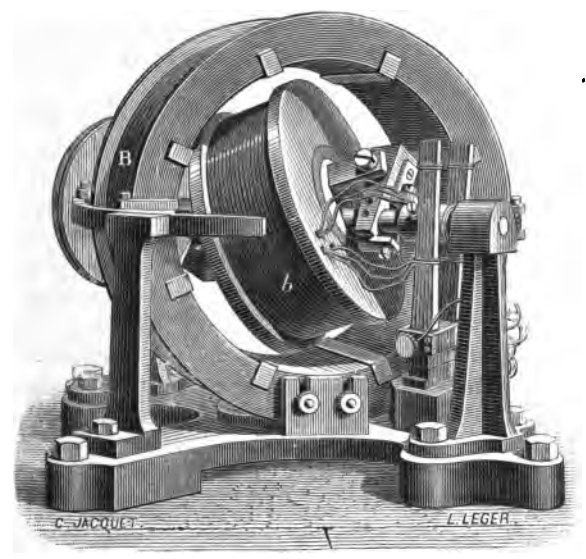


Fig. 80. — Moteur écliptique de M. Jablochkoff.

retards dus au magnétisme rémanent, c'est-à-dire persistant dans le fer, sont, il est vrai, évités, mais on renonce aux actions magnétiques que celui-ci exerce. Or, il paraît actuellement reconnu qu'il est fort difficile d'obtenir des actions puissantes sans l'intervention du fer doux. Les deux petits moteurs précédents sont donc faibles et plutôt théoriquement curieux que véritablement utiles.

IV. — APPLICATIONS DES PETITS MOTEURS

Les machines à coudre. — Le télégraphe Baudot. — Les transports postaux. —Le synchronisme Marcel Deprez. — Le bateau Trouvé. — Le pianista. — Les moteurs intermédiaires. — Le transport postal Siemens. — Les moteurs Méritens, Gramme.

Les petits moteurs dont nous venons de parler ont reçu un certain nombre d'applications qu'il est intéressant de signaler.

La première qui se présente à l'esprit et qui a été déjà tentée depuis longtemps, comme on l'a vu dans la première partie de ce volume, est la mise en mouvement des machines à coudre. Il est certain qu'il y aurait un sérieux intérêt à pouvoir la réaliser pratiquement; la conduite de ces machines pendant un temps un peu long n'est pas sans avoir de fâcheuses conséquences pour la santé des femmes. Les divers petits moteurs que nous avons indiqués se prêtent très bien à ce travail, quelques- uns ont été imaginés expressément dans ce but, par exemple le moteur Griscom. Si cette application ne s'est pas répandue, ce n'est pas le petit moteur qui a fait défaut, mais bien la source d'électricité. Les piles puissantes sont peu nombreuses, d'un maniement difficile et dangereux, quelques-unes donnent de mauvaises odeurs. A vrai dire, il n'en est guère qu'une qui ait été employée sérieusement, c'est la pile au bichromate de potasse, mais elle se prête assez difficilement à une action prolongée. Si l'on arrive un jour à combiner une pile maniable puissante, constante et n'étant pas trop dispendieuse, il n'est pas douteux que cette application ne prenne rapidement une extension très grande.

Au poste central des télégraphes à Paris les petits moteurs Marcel Deprez ont été longtemps employés pour faire mouvoir l'organe distributeur de l'appareil télégra-

phique multiple Baudot. Cet organe doit être maintenu dans une rotation rapide et constante. C'est un mouvement qui demande très peu de travail, mais veut beaucoup de régularité; les moteurs électriques se prêtent bien à un service de ce genre, et parmi eux le moteur Deprez, qui est magnéto-électrique, apporte entre autres avantages une moindre tendance à la variation. Actuellement ce service est fait par de petites turbines à eau du système Humblot; ce genre de moteurs est appliqué dans tout le poste central pour animer les télégraphes à rotation continue.

Une application très intéressante des moteurs électriques avait été projetée et expérimentée en 1880 par MM. Marcel Deprez et Bontemps. On se proposait d'opérer par leur intermédiaire le transport des dépêches, pour remplacer les tubes pneumatiques dans lesquels elles sont actuellement transportées. Ce système, qui a de grands avantages, a un grand inconvénient; on sait en quoi il consiste : dans un tube cylindrique est placé un petit récipient formant projectile, dans lequel sont les dépêches; une machine à air fait le vide devant le projectile, en même temps qu'elle comprime l'air derrière lui; ainsi chassé par la différence des pressions, le petit porte-dépêche parcourt le tube et se rend à destination. Dans cette opération, en même temps qu'on met en mouvement le projectile, on transporte avec lui toute la colonne d'air renfermée dans le conduit; on crée ainsi des frottements considérables. Le service du transport pneumatique des dépêches dans Paris absorbe actuellement le travail de 120 chevaux-vapeur. L'idée de MM. Marcel Deprez et Bontemps consistait à créer un petit chemin de fer dont les rails auraient formé conducteur électrique; une petite locomotive aurait été animée par un moteur système Marcel Deprez, disposé comme on le voit dans la figure 81. Il est du type que nous avons nommé Ladd-Deprez, c'est-à-dire à électro-aimant; mais au lieu d'une bobine il en

porte deux, EG, E'G', une à chaque extrémité. Ces bobines sont directement appliquées sur l'essieu des roues. Le courant venant par l'un des rails monte par les roues d'un côté, et redescend par celles de l'autre; dans son trajet il met en mouvement les bobines, celles-ci entraînent les roues, et la locomotive marche. Le projet était de disposer sur ce chariot-moteur une petite boîte dans la-

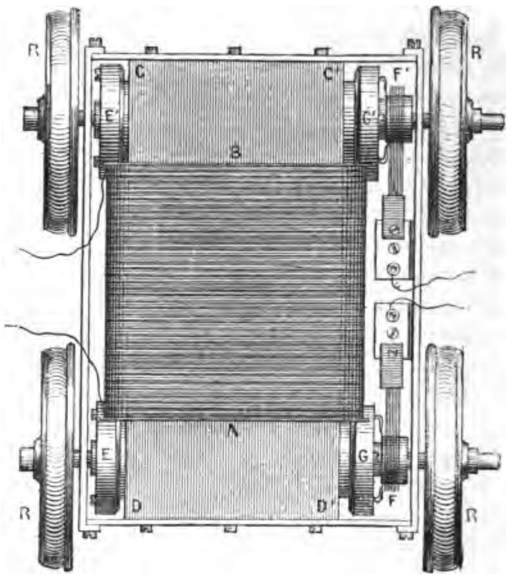


Fig. 81. — Chemin de fer postal de MM. Deprez et Bontemps.

quelle on placerait les dépêches et même de petits colis. Le tube était supprimé et remplacé par un petit chemin de fer, afin d'éviter les frottements d'air. L'essai fait au poste central des télégraphes réussit très bien. Ainsi qu'on le verra plus loin, un essai analogue fut fait presque en même temps en Allemagne. On calculait que le service des dépêches ainsi effectué n'exigerait pour Paris que 12 chevaux-vapeur au lieu de 120, économie importante. Il n'a

pas été mis à exécution. Il eût fallu changer le service installé, et puis, raison plus puissante encore, le petit chemin de fer à établir eût réclamé, dans les égouts où sont

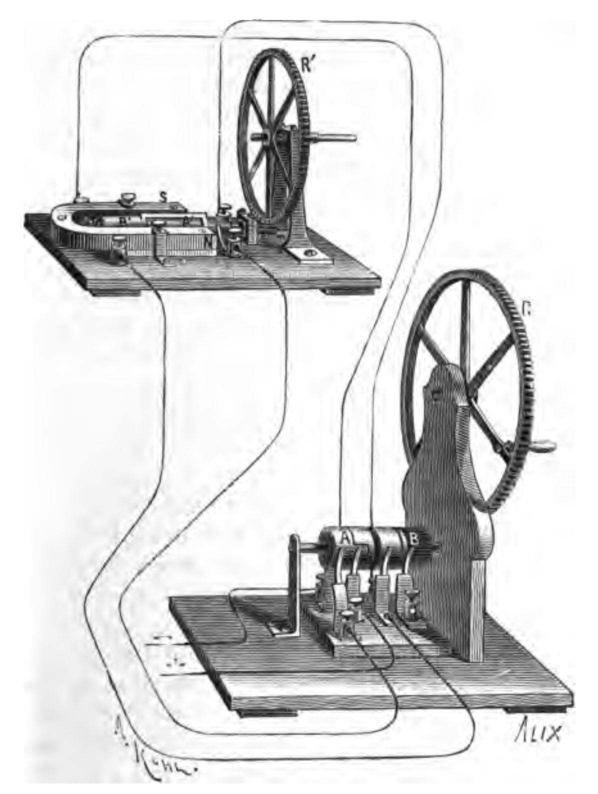


Fig. 82. — Système de synchronisation de mouvements de M. Deprez.

les tubes, une place plus grande que ces derniers; or, avec les conduites d'eau, câbles télégraphiques, fils téléphoniques, tubes pneumatiques, etc., la place commence à être très strictement mesurée sous ces voûtes destinées

à un autre usage, et qui n'avaient pu prévoir tant d'inventions nouvelles.

M. Marcel Deprez a encore fait de son moteur une application spéciale très curieuse. Il peut y avoir utilité à reproduire à distance un mouvement de manière que les deux mobiles se suivent exactement. Vous pourriez, par exemple, placer à la station de départ une aiguille sur un cadran; à la station d'arrivée serait une aiguille pareille qui devrait reproduire le mouvement de la première quel qu'il fût, tournant toujours aussi vite qu'elle, et s'arrêtant au même point. On dit alors que les mouvements sont synchrones. Le problème a été résolu à l'aide du moteur Marcel Deprez. On le modifie légèrement; au lieu d'une bobine, le moteur en porte deux mises l'une au bout de l'autre; les lames de fer de ces deux bobines sont croisées à angle droit, comme on le voit en A′B′ dans la figure 82. (Cette disposition avait même été indiquée par M. Marcel Deprez avant que M. Cloris Baudet l'adoptât pour en faire un moteur comme on l'a vu plus haut.) A la station de départ est une sorte de commutateur tournant AB envoyant sur la ligne une série de courants alternativement renversés. La théorie montre et l'expérience prouve que le moteur reproduit alors avec une exactitude parfaite les mouvements du commutateur, et cela jusqu'aux plus grandes vitesses.

M. Trouvé s'est principalement efforcé d'appliquer son petit moteur aux véhicules. Il avait construit avant l'Exposition d'électricité de 1881 un vélocipède électrique qui donnait des résultats; il était moins intéressant que le bateau qu'il avait mis sur la Seine et qui a fonctionné dans le petit bassin de l'Exposition. Pour cette dernière application, il faisait usage d'un petit moteur double (fig. 83), c'est-à-dire à deux bobines juxtaposées, placé sur la tête du gouvernail; le mouvement était transmis par une chaîne de Galle à une petite hélice placée dans le gouvernail même, disposition avantageuse à la

manœuvre. L'électricité était produite par des piles au bichromate de potasse placées au milieu du petit canot, et amenée au moteur par deux câbles souples faisant en

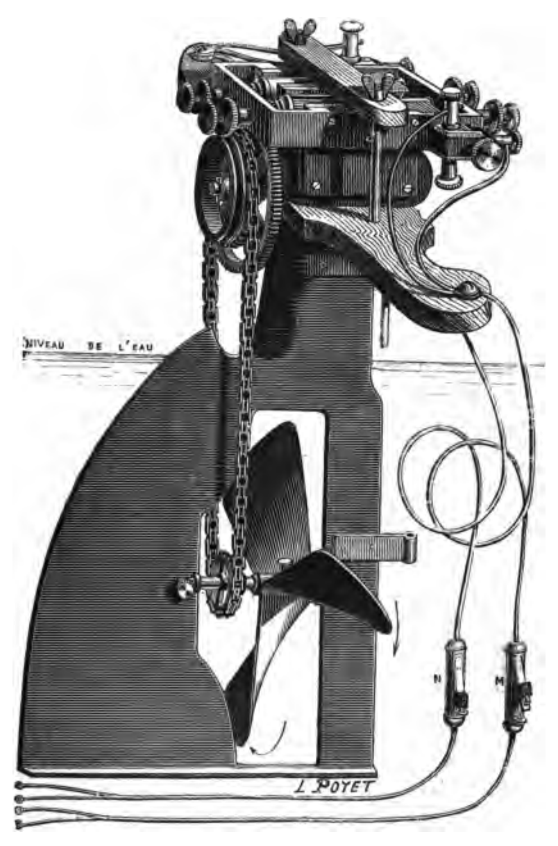


Fig. 83. — Moteur Trouvé appliqué à la navigation.

même temps office de cordages pour manier le gouvernail. L'ensemble était léger et manœuvrait convenablement. L'aspect général est représenté figure 85. On a pu avec

ce canot remonter la Seine avec une vitesse d'environ 1 mètre et demi par seconde : on faisait usage pour cela d'une pile électrique à bichromate de potasse où les lames de zinc sont attachées à une sorte de petit treuil, de manière à pouvoir être descendues à volonté dans les auges qui renferment le liquide excitateur. La pile ne travaille ainsi que lorsqu'on le veut, et se conserve lorsqu'elle n'a

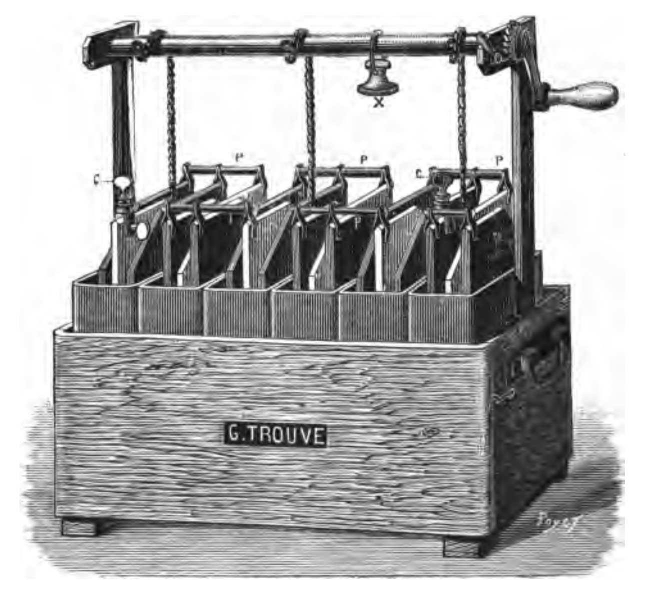


Fig. 84. — Pile au bichromate appliquée au bateau électrique de M. Trouvé.

pas à fournir d'énergie. La figure 84 donne la disposition de cette pile. M. Trouvé construit du reste des modèles différents de son système moteur appliqué à la navigation, et quand le bateau exige une certaine force motrice, il place le moteur dans l'embarcation même de manière à le faire agir directement sur l'axe de l'hélice.

Une autre application de ce même moteur se trouvait



Fig. 85 — Bateau électrique de M. Trouvé sur la Seine.

à l'Exposition de 1881. On l'avait employé à mettre en action un pianista. Le pianista est une sorte de clavier mécanique, mis en jeu par l'air comprimé; on le place devant un piano ordinaire. En introduisant dans le pianista des feuilles de carton percées de trous comme

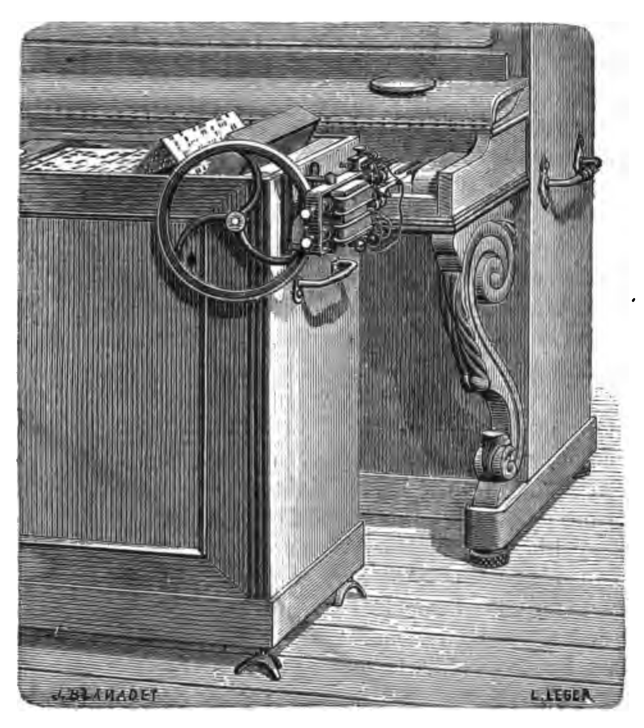


Fig. 83. — Pianista à moteur électrique.

les cartons d'une Jacquard et faisant défiler ces feuilles par la rotation d'une manivelle, l'appareil abaisse sur les notes du piano une série de leviers et exécute un air de musique. Le moteur électrique était employé à faire tourner la manivelle dont le maniement est un peu pé-

nible. Celui qui avait été appliqué au pianista de l'Exposition et que nous représentons figure 86 avait des dimensions si petites qu'on a pu l'adapter sur le côté de l'appareil sans entraîner aucun encombrement, et son adaptation a été faite d'une manière très heureuse par M. Journaux qui a du reste appliqué encore le moteur Trouvé à ses machines à coudre. Le pianista fonctionnait sous l'influence de six accumulateurs Faure et d'une petite pile complémentaire pour les grands effets. C'est une application sur laquelle il est inutile d'insister, et l'on conçoit bien que toutes les fois qu'on aura à produire une rotation régulière sans beaucoup de travail, les petits moteurs électriques seront d'un usage très commode. On en pourrait imaginer beaucoup de ce genre dont l'énumération n'aurait pas d'intérêt.

M. Trouvé a donné à son petit moteur une autre application assez singulière. Dans les pays agricoles, surtout dans ceux où l'on cultive en pâturages, on fait grand usage des eaux courantes pour les arrosages. Ces eaux sont alors divisées et aménagées avec beaucoup de soin. Chacun des riverains d'un ruisseau a, par exemple, son jour d'arrosage pendant lequel il dispose de l'eau. Pour l'amener sur les terrains à irriguer on est obligé d'établir de petits travaux consistant en rigoles, et surtout en petits barrages propres à surélever le niveau de l'eau en un point pour l'amener à la hauteur du sol qu'elle doit arroser. Ces travaux sont assez coûteux à établir et surtout à entretenir : M. Trouvé a employé son petit moteur à faire agir une chaîne à godets qui élève l'eau et remplace les barrages. Tout bien compté, il ne semble pas que le moyen puisse être moins coûteux que l'installation d'une petite vanne, grâce surtout à la dépense élevée de la pile; il est cependant assez original pour qu'il vaille la peine d'être cité. D'ailleurs, il pourrait s'appliquer à défaut de travaux faits d'avance ou dans un cas pressé, si les travaux établis se trouvent mis hors de service. Au reste,

c'est le cas général pour tous ces petits moteurs qui pourraient tous être fort utiles dans une circonstance imprévue où le besoin d'un peu de force se ferait inopinément sentir.

En général, tous ces petits moteurs ont été appliqués dans toutes les occasions où l'on voulait une rotation régulière sans qu'un grand travail fût nécessaire, ainsi que l'avaient été d'ailleurs les machines antérieures, comme on l'a vu dans notre première partie. Ils ont, ainsi que nous l'avons dit, succédé à leurs prédécesseurs en élargissant le champ des applications. Il convient de citer les chronographes, giroscopes, miroirs de Foucault, etc., que ces moteurs mettent en mouvement d'une façon convenable. M. d'Arsonval a fait du moteur Trouvé une application intéressante. Dans certaines observations physiologiques on est obligé d'entretenir artificiellement pendant longtemps la respiration d'un animal soumis à l'expérience; on faisait usage pour cela de soufflets mus par une petite chute d'eau : M. d'Arsonval a trouvé grand avantage à employer les moteurs électriques; ils se relient très simplement au soufflet, lui donnent un mouvement très régulier et accomplissent leurs fonctions en fournissant une complète sécurité.

Avant de quitter les petits moteurs, nous devons signaler des types particuliers. Nous avons dit qu'en général les grandes machines ne se prêtaient pas à une réduction extrême des dimensions : cela est vrai en principe, mais non absolument. Ainsi vers 1880, MM. Siemens et Halske firent une expérience de chemin de fer postal à l'aide de la machine ordinaire du type Siemens, exécutée en petites dimensions.

Ils créèrent ainsi une petite locomotive analogue comme fonctionnement à celle que nous avons décrite plus haut page 187, cette dernière est d'ailleurs un peu postérieure. Le système formait alors un véritable petit train ayant une locomotive et des petites boîtes-wagonnets portant les dépêches comme on le voit figure 87. On se proposait même d'opérer ainsi le trans-

port de petits colis, ce qui aurait été d'une grande commodité. Des difficultés du même genre que celles que nous avons signalées ont arrêté l'exécution définitive de ce système. La petite machine employée ne différait que par ses dimensions des grandes machines Siemens.

Il a été créé depuis l'Exposition deux types de moteurs qui procèdent des grandes machines et qui constituent des intermédiaires entre les grands et les petits moteurs. L'un est dû à M. de Méritens, l'autre à M. Gramme : le premier a repris l'anneau Pacinotti, c'est-à-dire, comme on le voit (fig. 88) un anneau mobile formé d'enroule-

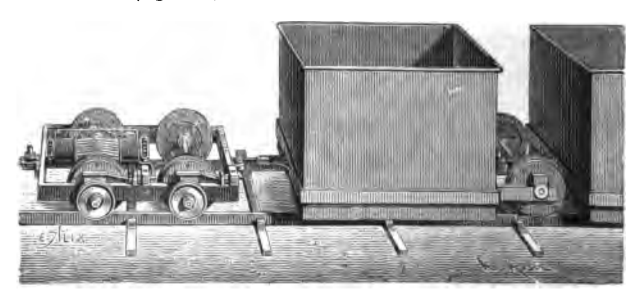


Fig. 87. — Chemin de fer postal de M. Siemens.

ments divisés en sections distinctes séparées par de petites portions de fer doux. Il a formé son inducteur d'une sorte de cercle ou plutôt d'anneaux de fer portant des enroulements de façon à constituer deux aimants semi-circulaires, comme dans le moteur Griscom décrit ci-dessus. Il a crée ainsi une machine assez simple, qui peut être produite dans des conditions convenables de bon marché : il en a même constitué divers types donnant depuis 15 jusqu'à 50 et 100 kilogrammètres par seconde. Ces machines trouveront certainement beaucoup d'applications. L'un des types de ces petites machines a été pourvu d'un bâti à engrenages, de façon qu'il peut être

mis en mouvement à l'aide de manivelles par quatre hommes. Il fournit ainsi pendant quelques minutes des courants puissants et sera très précieux pour les laboratoires où il permettra de réaliser les expériences électriques sans être soumis à la pénible besogne de monter et entretenir une pile d'un grand nombre d'éléments.



Fig. 88. — Moteur de M. de Méritens.

Il en est de même du petit moteur Gramme qui figurait à l'Exposition, mais qui n'a été mis dans le commerce que depuis sa fermeture.

Comme on le voit par la coupe, figure 89, c'est un type légèrement modifié de la machine de Gramme. L'anneau n'a pas changé, mais les électro-aimants inducteurs ont

été reportés d'un seul côté, et ils forment en même temps le bâti de la machine. Le rendement de cet appareil est, paraît-il, avantageux. La forme est bien compacte et élégante. L'appareil présente du reste beaucoup d'ana-

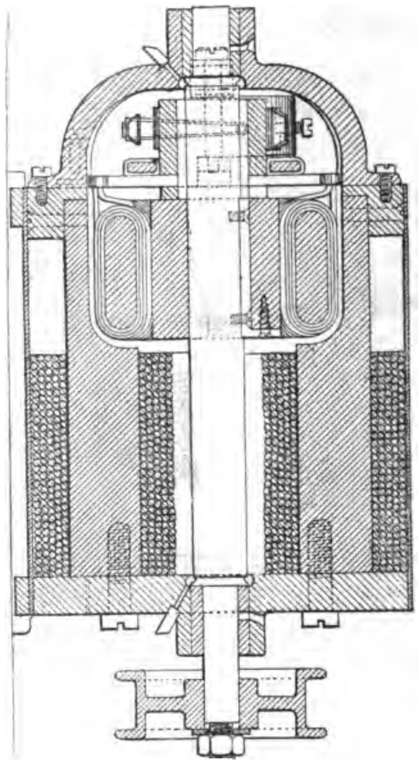


Fig. 89. — Petit moteur de M. Gramme.

logie avec la machine Pacinotti, et si l'on veut se reporter à celle-ci, on verra qu'en supposant la machine Gramme relevée verticalement (ainsi qu'elle est figurée) on retrouve l'ancien appareil à très peu près

Il faut d'ailleurs s'attendre à voir se produire de nouveaux types de ces moteurs le jour où l'on disposera d'une source électrique convenable. Ainsi que nous l'avons dit, la pile électrique telle qu'elle est actuellement est inacceptable dès qu'on veut arriver à la production continue d'un travail de quelque importance : elle est à la fois dispendieuse, inconstante, et surtout très incommode. Qu'on arrive à la perfectionner, cela est probable, mais il est à supposer qu'on arrivera d'abord à produire l'électricité en grandes masses à l'aide de fortes machines pour la répartir ensuite par petites quantités en différents points, en un mot on peut espérer qu'on arrivera avant quelques années à distribuer l'électricité. Nous reviendrons plus loin sur cette question; le jour où ce problème sera complètement et pratiquement résolu, les types de petits et moyens moteurs électriques qui viennent d'être décrits se répandront immédiatement, et nous en verrons sans aucun doute apparaître beaucoup d'autres, au grand avantage du travail individuel.

V. — PREMIÈRES APPLICATIONS DU TRANSPORT DE LA FORCE

Expériences de Sermaize, de Noisiel. — Les premières machines spéciales. — La machine Gramme octogone. — La haute tension. — Les machines à labourage.

Nous avons dit comment, à l'Exposition de Vienne, en 1873, MM. Fontaine et Gramme avaient soumis au public la première application sérieuse du principe de la réversibilité des machines électriques, et en même temps le premier exemple sérieux du transport électrique de la force, en faisant marcher une pompe à une distance de 1 kilomètre d'un moteur à gaz.

On n'entra qu'assez lentement dans cette voie; il y avait

à cela plusieurs raisons; d'abord les machines génératrices d'électricité étaient faibles et surtout peu nombreuses; la rapide croissance de cette industrie, le nombre des types aujourd'hui dans le commerce, nous font illusion; mais on ne doit pas oublier qu'en 1873, parmi les machines actuellement en usage, la machine Gramme seule existait, encore était-elle fabriquée pour des applications spéciales parmi lesquelles la galvanoplastie dominait; l'éclairage électrique était à peine naissant; or, les dispositions réclamées dans les machines pour ce genre de travaux n'étaient point du tout celles qui sont favorables au transport de la force ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

On cite cependant une application tentée en 1877 à l'atelier d'artillerie de Saint-Thomas-d'Aquin. Les officiers firent fonctionner une machine à diviser à 60 mètres de la machine motrice. C'est une transmission qui se rapproche des traditions précédentes par la petitesse de l'énergie transmise. Vers 1878, M. Cadiat, au Val d'Osne, et la Compagnie des chemins de fer de Lyon firent des essais du même genre pour commander des machines-outils; mais l'application la plus saillante, celle qui compte comme la première véritablement pratique, fut réalisée par MM. Félix et Chrétien à la sucrerie de Sermaize en 1879. De grandes expériences publiques furent faites et causèrent une vive impression dans le monde électrique.

Le travail exécuté électriquement était un labourage. On sait que la culture mécanique et en particulier le labourage sont fort avantageux, ils sont à la fois économiques et productifs; mais ils présentent des difficultés particulières; on s'est servi jusqu'ici de machines à vapeur routières portant des tambours sur lesquels s'enroulait un cable d'acier remorquant une charrue à plusieurs socs. Le résultat est satisfaisant, mais ces machines sont fort lourdes, elles ne peuvent arriver partout; elles nécessitent un approvisionnement considérable de combus-

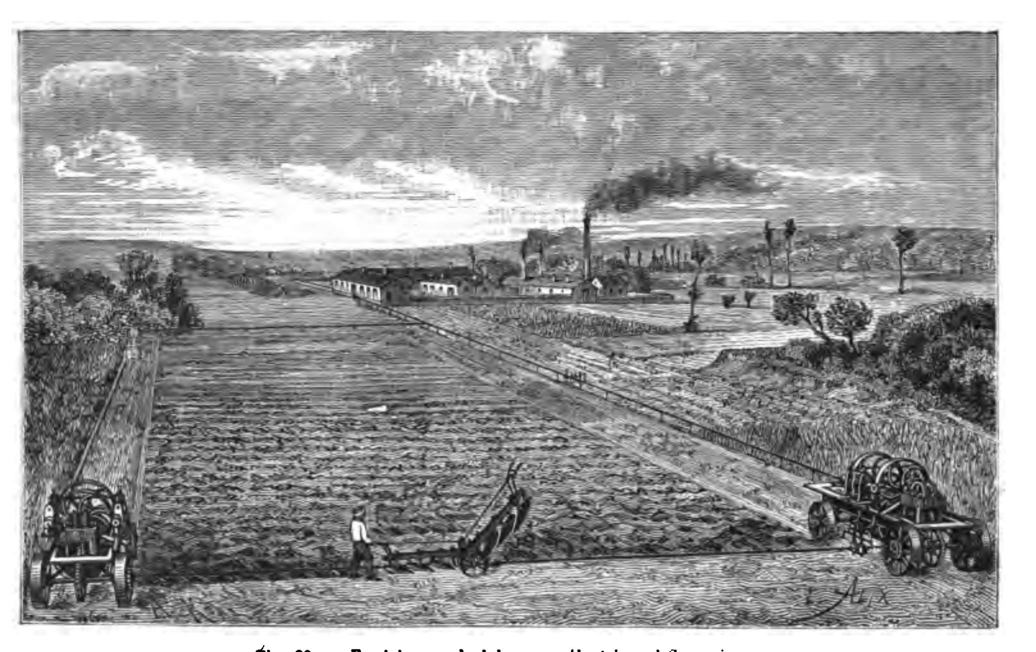


Fig. 90. — Expériences de labourage électrique à Sermaize.

tible et font une grosse dépense d'eau, tous objets fort incommodes et coûteux à conduire au lieu du travail. Avec l'électricité, ces exigences disparaissent. Dans l'expérience de Sermaize on employait deux chariots pesant chacun deux tonnes au lieu de dix-huit, poids des machines routières : ces chariots portent chacun un tambour pouvant enrouler et dérouler un câble, et deux machines dynamo-électriques du type ordinaire de Gramme. Lorsqu'on envoie un courant électrique dans ces machines, elles

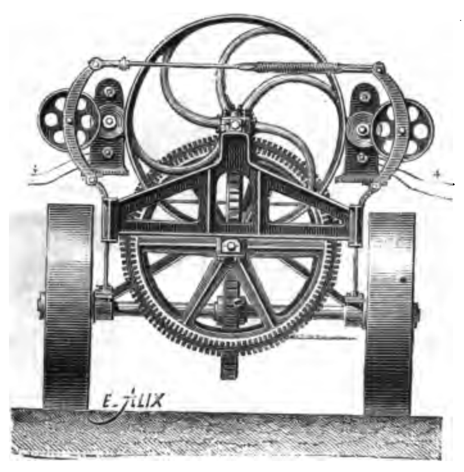


Fig. 91. — Machine à labourage électrique (vue transversale)

entrent en mouvement, et cette rotation peut être utilisée soit à faire tourner les roues du chariot, qui sous cette impulsion se met en marche comme une machine à vapeur routière, soit à faire tourner le tambour qui par la traction de son câble amène alors à lui l'appareil agricole et fait tracer son sillon à la charrue. L'électricité produite à l'usine est amenée par des câbles conducteurs aux appareils. La figure 90 donne l'idée de l'ensemble du travail. On pense bien qu'on n'appliquerait pas ce système au labourage d'une pièce de terre aussi petite que celle

qui est représentée, nous avons dû la réduire afin de pouvoir montrer d'un seul coup les diverses parties essentielles de l'expérience, c'est-à-dire l'usine productrice d'électricité que l'on distingue au fond et les machines réceptrices indiquées au premier plan.

Nous donnons ci-contre les dessins des chariots qui ont servi pour ces opérations. La figure 91 est une vue de face dans laquelle on distingue bien les profils des deux machines, type Gramme, qui forment moteurs ; elles

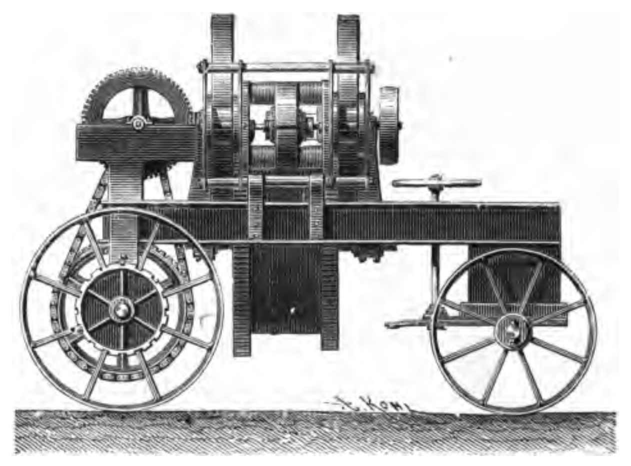


Fig. 92. — Machine à labourage électrique (vue longitudinale).

sont en quelque sorte suspendues sur un bâti commun dont la pièce supérieure est une barre à vis permettant de les presser contre une grande poulie placée entre elles. On ne doit pas oublier en effet que ces appareils tournent très vite, à raison d'environ 600 tours par minute ; il faut donc une transformation considérable du mouvement pour arriver à obtenir l'effort puissant qui doit être exercé sur le câble et la marche lente qui doit être imprimée à la charrue. La figure 92 est une vue de

côté, on y voit l'une des machines de Gramme. Au-dessous du bâti du chariot, se montre à moitié le tambour qui porte le câble et le déroule, ainsi que les roues dentées qui l'entraînent. A gauche, on aperçoit le système qui sert à donner le mouvement aux roues du chariot et en fait, au moment du besoin, une locomobile électrique.

Il reste à parler des machines génératrices qui fournissaient l'électricité à ces machines réceptrices. A l'origine c'étaient de simples machines de Gramme du type ordinaire, destinées spécialement à donner de la lumière, mais on fut bientôt conduit à construire des machines spéciales. Plusieurs motifs y amenèrent. Le premier c'est simplement que ces générateurs construits pour d'autres usages n'étaient pas en état d'absorber beaucoup de force et de la transmettre sous la forme d'énergie électrique; il fallait donc en avoir de plus puissants. Le deuxième motif est que ces générateurs fournissaient l'énergie sous une forme incommode; il convient d'insister sur ce point.

Lorsqu'on veut évaluer le travail que peut fournir une chute d'eau, on fait entrer en ligne de compte deux éléments : la quantité d'eau qu'elle fournit par seconde que nous appellerons Q si l'on veut, et la hauteur d'où l'eau tombe, que nous nommerons H; la puissance de travail de la chute est donc représentée par le produit QH. De même, si l'on veut connaître le travail que fournit un courant, il faut faire entrer en compte deux éléments : la quantité d'électricité qui s'écoule, ce qu'on nomme l'intensité I, et la force qui la fait circuler, la force électromotrice E : la puissance de travail du courant est donc représentée par le produit EI. Au point de vue de la somme totale de travail, il est indifférent que ce produit soit obtenu d'une façon ou d'une autre; que E soit petit et I grand, ou que le contraire ait lieu, pourvu que le produit ne change pas, cela n'importe en rien pour le travail total. Cela importe beaucoup, au contraire, si ce travail

doit être transporté le long d'un fil conducteur et recueilli à distance comme on va le voir.

Nous avons dit que dans le transport électrique de la force on ne recueillait jamais tout le travail dépensé, qu'il y avait toujours une perte ; que devient l'énergie ainsi perdue ? Si l'on cherche bien, on la trouvera dans les fils conducteurs et dans les machines elles-mêmes transformée en chaleur. Les lois de Joule permettent de connaître quelle quantité est ainsi dissipée. Si l'on appelle R la résistance totale de tous les fils formant le circuit, machines et conducteurs, la chaleur qui s'y développera sur le passage d'un courant d'intensité I sera représentée par le produit RI^2. Dans l'application que nous étudions, toute cette chaleur nous est inutile et constitue une perte qu'il faut réduire au minimum, ce qui nous conduit à diminuer le plus possible la quantité I ; mais alors on voit que pour conserver au produit EI, représentant le travail total, sa même valeur, il nous faudra augmenter le facteur E ; nous sommes donc conduits à employer l'électricité à des tensions élevées,

Ces lois, bien qu'elles ne fussent pas élucidées et fixées en 1879, comme elles l'ont été depuis, ainsi que nous le dirons, étaient cependant déjà pressenties ; aussi s'efforça-t-on de créer un type de machine à tension plus élevée que celles qu'on possédait. Il y a pour cela deux moyens ; nous savons que les courants s'obtiennent en faisant passer un fil dans un champ magnétique ; l'expérience prouve que la tension ainsi obtenue est d'autant plus élevée que le passage est plus rapide ; on doit donc faire tourner la machine aussi rapidement que possible ; d'autre part, plus on renouvellera les passages du fil dans un champ magnétique, plus on aura d'impulsions électriques qui pourront être accumulées et s'ajouteront en tension ; on est donc amené à multiplier le nombre des champs magnétiques dans lesquels passe le fil tournant de la machine. Sur ces idées, M. Gramme transforma ses appareils et construisit le type représenté figure 93. L'anneau

tournant est plus grand. Quant aux électro-aimants, il semble d'abord qu'il y en ait huit, mais on voit bientôt qu'ils se réunissent deux à deux par leurs extrémités, de façon à former en tout quatre champs magnétiques. Un collecteur qui ne se voit pas sur la figure permet d'ajouter ensemble les impulsions inductrices ainsi produites et d'obtenir des tensions plus élevées. Celles des premières

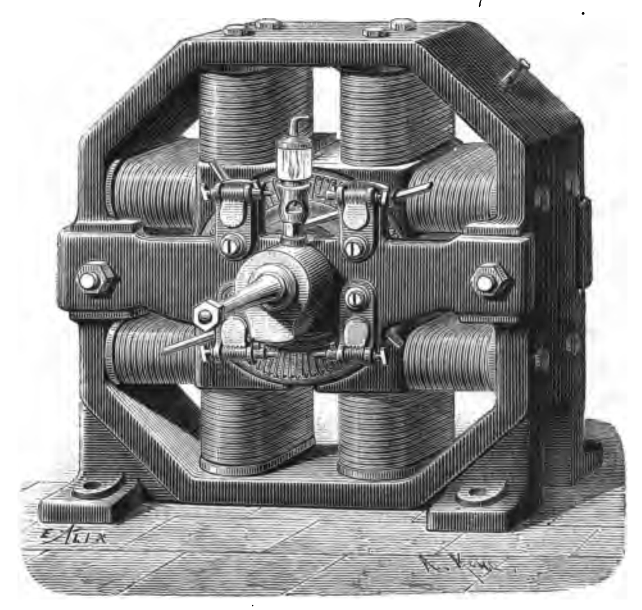


Fig. 93. — Machine de Gramme pour les grandes forces.

machines à lumière s'élevaient environ à 60 ou 70 volts, celle de ces machines dites octogones monta vers 250 ou 300. Nous verrons bientôt que ce n'était là qu'un pas timide et qu'il fallait aller beaucoup plus loin. Cependant ces machines rendirent des services et nous les retrouverons bientôt en parlant de l'Exposition d'électricité et des applications qui l'ont suivie.

VI. — PREMIÈRES APPLICATIONS A LA TRACTION DES VOITURES

Chemins de fer électriques de l'Exposition de Berlin, — de Lichterfelde, — de Menlo-Park, etc.

L'une des applications qui devaient être essayées, celle peut-être dans laquelle l'électricité apporte le plus sensible perfectionnement, est la traction des véhicules. En effet, dans tous les systèmes en usage jusqu'ici, l'agent moteur se transporte avec l'ensemble des mobiles qu'il a pour mission de traîner; le cheval marche devant la charrette, la locomotive roule avec le train; et là, non seulement nous avons à mouvoir le moteur lui-même, c'est-à-dire la machine à vapeur proprement dite, mais encore le producteur de vapeur, la chaudière, et aussi le producteur de chaleur, le charbon, et avec lui l'eau: tout cela demande une dépense considérable de force. Vraiment en contemplant certaines locomotives, ce qui étonne ce n'est pas qu'elles puissent traîner des voitures, c'est plutôt que ces engins énormes puissent se mouvoir eux-mêmes. En faisant usage de l'électricité, le système moteur qui doit se déplacer avec les véhicules est réduit à la machine électrique réceptrice, qui peut être fort légère; la production de la force se fait à distance dans un centre fixe où l'on peut, sans aucun inconvénient, disposer les machines aussi pesantes qu'on le désire. Quant à la liaison entre le générateur fixe et le moteur mobile, elle peut s'opérer de diverses façons, mais dans tous les cas elle ne gêne en rien le roulement des voitures.

Les premiers essais de ce genre sont cependant assez récents; presque tous, comme on le verra, sont dus à la maison allemande Siemens et Halske.

La combinaison à inventer n'a en elle-même rien de com-

pliqué; c'est le transport électrique de la force dans sa plus grande simplicité. De quoi s'agit-il après tout? de mettre en rotation les roues d'un véhicule. La machine dynamo-électrique est éminemment propre à cet usage puisque, appliquée à produire de la force, elle se présente comme un axe doué de la propriété de tourner tout seul à volonté. Il nous suffira donc, au point de départ, d'installer une machine dynamo-électrique mue par un moteur convenable, envoyant son courant dans une machine analogue portée par le véhicule à mouvoir. Le système en lui-même ne constitue pas proprement une invention, il ne comporte même pas beaucoup de variations dans l'exécution, au moins dans quelques-unes des parties principales; il y a cependant, comme on le verra, des difficultés à vaincre dans la pratique, et on a dû y dépenser après tout une assez grosse dose de travail et d'ingéniosité.

La première application de ce genre qu'on puisse citer fut réalisée par la maison Siemens et Halske, à l'Exposition de Berlin, pendant l'été de 1879. C'était un petit chemin de fer de démonstration, établi dans des proportions exiguës. La longueur du trajet était d'environ 300 mètres; il était installé suivant une courbe ovale fermée, en sorte que les voyageurs revenaient au point de départ. Le train se composait d'une petite locomotive électrique et de voitures pour les voyageurs. Ces dernières étaient de petites plates-formes montées sur des roues basses, et portant une banquette à deux faces, disposée dans le sens longitudinal de la voie. L'ensemble du train présentait l'aspect donné par la figure 95 ci-jointe.

Pour la locomotive, elle se composait simplement d'une machine dynamo-électrique du système Siemens, analogue à celle qui est représentée figure 68. Cet appareil était couché horizontalement sur un bâti à roues; la bobine induite, l'organe tournant était longitudinal à la voie, les électro-aimants inducteurs étaient placés perpendiculairement à celle-ci. La figure 94 est une coupe en travers, et

la figure 96 une coupe en long de cet arrangement. La deuxième montre en coupe les roues d'engrenage *l*, *t*, *v* et *x*, par lesquelles le mouvement de rotation de la bobine était transformé pour être transmis aux roues motrices de la petite locomotive; la figure 94 montre la roue d'angle *x* qui complétait cette communication de mouvement.

Il reste à voir comment le courant électrique venait de

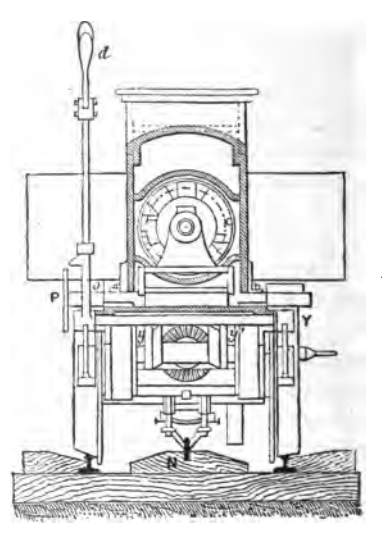


Fig. 94. — Locomotive électrique de Siemens (coupe transversale).

la machine génératrice, comment il pénétrait dans la machine réceptrice et comment il opérait son retour.

Pour amener le courant, on faisait usage d'une barre de fer N (fig. 94) placée entre les deux rails et encastrée dans un bloc de bois qui la maintenait tout en l'isolant électriquement du sol. Sur cette barre, qui courait tout le long de la voie, s'appuyaient deux frotteurs à ressort qui tenaient à la locomotive; le courant montait par ces frotteurs dans la machine; après avoir produit le travail, il

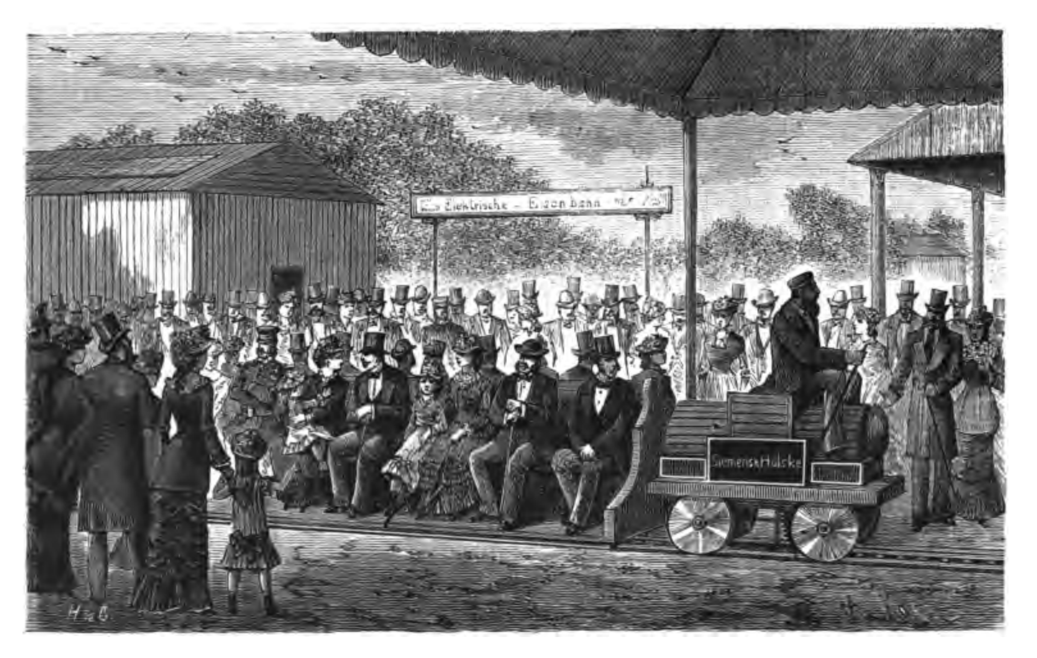


Fig. 93. — Chemin de fer électrique de l'Exposition de Berlin.

était amené aux roues du véhicule, passait de là dans les rails de fer, et retournait ainsi à la machine génératrice : il importait assez peu que ces rails fussent bien isolés; s'il y avait quelque fuite par la terre, elle ne servait qu'à compléter le retour, la machine étant également en rapport avec la terre.

Un levier *do* servait à prendre ou à interrompre la communication et à mettre ainsi en mouvement ou à arrêter le petit train.

Cette belle expérience réussit très bien et eut un grand

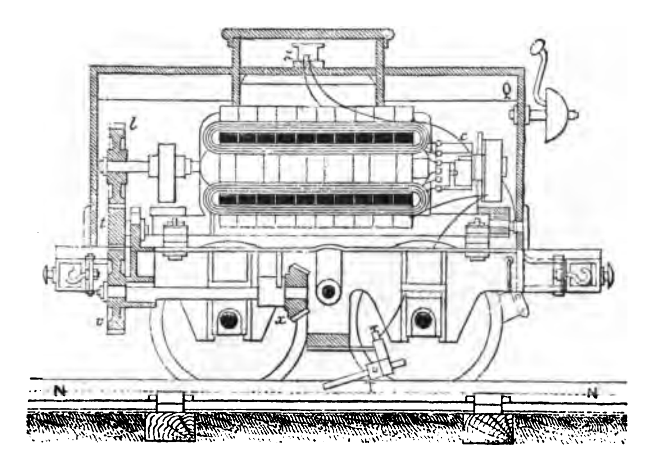


Fig. 96. — Locomotive électrique de Siemens (coupe longitudinale).

succès; aussi le petit chemin de fer fut-il réinstallé successivement dans diverses villes; on le vit à Bruxelles, à Düsseldorf, à Francfort. Dans cette dernière ville, il allait de l'Exposition à la gare du railway, sur une longueur de 250 mètres; trois tunnels en miniature avaient été installés sur son parcours et le rendaient plus pittoresque.

Des tentatives plus sérieuses devaient sortir de ce premier essai. Le 12 mai 1881, un tramway électrique à

service réel fut inauguré auprès de Berlin, entre Lichterfelde et l'école des cadets, par les soins de la même maison Siemens et Halske.

Ce n'était pas le premier projet; il s'agissait d'abord d'établir un chemin électrique dans Berlin même. Diverses raisons firent ajourner ce travail sur lequel nous reviendrons plus loin; en attendant le plus on fit le moins.

La longueur de la voie ainsi installée est de 2450 mètres; elle est placée au niveau du sol, sauf les légères dénivel-

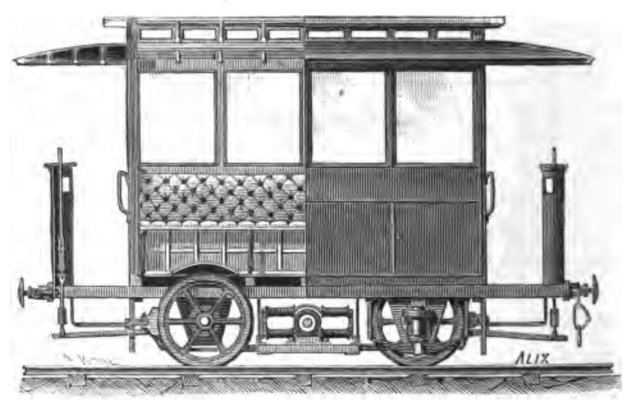


Fig. 97. — Wagon électrique de Lichterfelde.

lations entraînées par le tracé des pentes. Le dispositif générateur d'électricité comprenait d'abord deux machines du système Siemens; cet arrangement n'était au reste que provisoire, et ces machines doivent être remplacées par une seule machine plus puissante, directement reliée avec un moteur à vapeur rotatif.

Le système des véhicules est complètement différent de celui qui avait été employé dans la première expérience : ici, il n'y a plus de voiture locomotive traînant d'autres voitures. Chaque véhicule porte lui-même son organe

moteur; le wagon a la forme d'un tramway du modèle en usage dans diverses grandes villes, comme Paris, Bruxelles, etc. Ces voitures peuvent contenir 26 personnes. On en trouvera la représentation dans les figures 97 et 98. La première de ces figures montre entre les deux roues, sous la caisse, la machine électrique motrice; c'est naturellement une machine Siemens; la bobine tournante est placée perpendiculairement à l'axe de la voie. Son mouvement est transmis aux roues à l'aide de courroies prenant leur contact sur un tambour extérieur à la roue, comme on le voit figure 98. Cette transmission suffit en même temps à la transformation qui s'opère ainsi beaucoup plus simplement que dans le système précédent. Les voitures sont pourvues de freins qui peuvent être serrés de l'un ou l'autre bout; de même la prise du courant peut être opérée de l'un ou l'autre bout, en sorte que la voiture va alternativement dans un sens et dans l'autre sans être retournée, comme font du reste les tramways.



Fig. 98. — Wagon de Lichterfelde (coupe transversale).

On a également placé, à la disposition du conducteur, un système permettant d'introduire dans le circuit des résistances artificielles de façon à régler la vitesse; toutefois ces organes ne sont pas d'un grand usage, la vitesse se réglant pour ainsi dire d'elle-même par une heureuse propriété des machines dynamo-électriques : c'est un point sur lequel il faut insister un peu.

Au chapitre II de cette deuxième partie où sont exposées les conditions dans lesquelles est transmis le travail mécanique à l'aide de l'électricité, il a été dit que lorsque la machine réceptrice, celle qui exécute le travail, doit supporter un effort très grand, elle marche très lentement : il s'ensuit que le courant de la machine génératrice, n'étant que très peu contrarié, passe avec intensité et fournit à la machine réceptrice le moyen d'exercer l'effort nécessaire ; si cet effort diminue, la machine réceptrice marche de plus en plus vite, de façon à contrarier de plus en plus le passage du courant engendré ; celui-ci s'affaiblit ; avec lui s'affaiblit l'effort exercé, mais le travail total effectué augmente néanmoins en raison de l'augmentation de la vitesse, jusqu'à un certain maximum.

Les choses se passent ainsi dans l'application de la puissance électrique au mouvement des véhicules. Supposons notre voiture immobile sur une voie horizontale. Au moment où nous lui envoyons le courant électrique pour la mettre en mouvement, nous devons vaincre cette résistance particulière qu'opposent toujours les voitures au moment du départ, et qu'on nomme l'effort du démarrage ; à ce moment la machine électrique ayant à surmonter une forte résistance, tournera lentement ; le courant sera donc très fort et l'effort exercé sera suffisant pour surmonter l'obstacle. Une fois la voiture lancée, la résistance diminue, la machine et avec elle le véhicule s'accélèrent, en même temps le courant diminue, et cette action se produit jusqu'à ce que le véhicule ait pris une vitesse uniforme, et que le courant ait atteint la valeur nécessaire pour vaincre seulement les frottements qui tendent sans cesse à retarder le mouvement.

Si une montée se présente, la voiture se ralentira, le courant augmentera de nouveau, en sorte que le moteur, en raison même de son mouvement ralenti, recevra le surcroît de force nécessaire pour remonter le plan incliné.

Si au contraire la voiture doit descendre, elle accélérera

elle-même sa machine et augmentera le contre-courant de manière à diminuer la force qui la pousse. Il peut arriver que la machine réceptrice tourne ainsi aussi vite que la génératrice, ce qui annulerait complètement le courant : il peut même se faire qu'entraînée par son véhicule, la machine réceptrice tourne plus vite que l'autre, alors le sens du courant serait renversé, la machine réceptrice, au lieu de recevoir du travail aurait à en produire, ce qui tendrait à ralentir la voiture et formerait un frein électrique.

Au reste, les machines dynamo-électriques peuvent former un frein très puissant, il suffit pour cela de mettre la machine liée au véhicule en relation avec un circuit conducteur de faible résistance. Entraînée par le mouvement du véhicule lancé, la machine tournera et engendrera dans ce circuit un courant énergique, ce qui exigera un grand travail dépensé, obligera les roues du véhicule à un effort considérable et les ralentira très énergiquement. Il ne faut employer ce procédé qu'avec prudence; en effet, tout le travail électrique ainsi engendré se transforme en chaleur dans la machine génératrice et dans le circuit court qu'on lui a adjoint; on pourrait donc, en agissant de la sorte, brûler et détruire la machine. Toutefois, employé convenablement, ce moyen peut être très utile; il peut être absolument précieux dans un moment de danger où il faut, coûte que coûte, arrêter rapidement le véhicule, et où on ne craindrait pas de compromettre la machine pour préserver les voyageurs.

L'électricité était conduite de la machine fixe à la machine mobile par un procédé plus simple que dans la première expérience; elle était amenée par l'un des rails et revenait par l'autre. Il était nécessaire que les rails fussent isolés du sol, ce qu'on avait obtenu en faisant en sorte qu'ils touchassent seulement les traverses de bois sur lesquelles ils étaient fixés. Le courant était alors transmis à la machine par la circonférence de l'une des roues et en redescendait par la circonférence de l'autre.

Cette disposition simple et peu coûteuse a montré dans la pratique des inconvénients graves ; d'abord l'isolement est très difficile à maintenir, et malgré les soins, de fortes pertes de courant se manifestent souvent ; en second lieu, aux endroits où la voie ferrée est croisée par un chemin, il arrive qu'un homme ou un cheval, traversant la voie, touche à la fois les deux rails, il offre alors une dérivation au courant et reçoit une secousse qui peut être violente et dangereuse ; on maintint le système pour Lichterfelde, mais dans les autres applications on se proposa d'en ap-

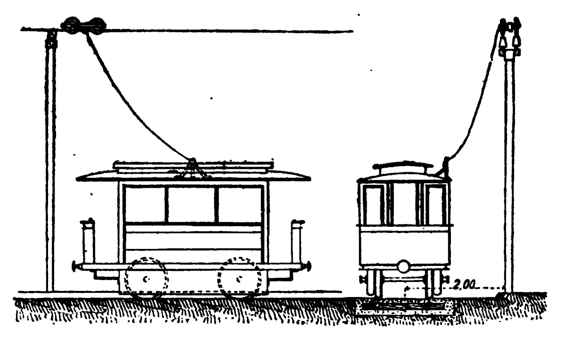


Fig. 99. — Nouveau mode de la transmission électrique aux wagons.

pliquer un autre et de donner au courant un conducteur spécial.

A cet effet, on établirait le long de la voie, sur des poteaux, un fil conducteur horizontal, et sur ce fil courrait un chariot métallique traîné par le véhicule auquel il amènerait le courant. Cette disposition, figurée dans le diagramme ci-joint (fig. 99) a été, en effet, appliquée en divers points et notamment sur le tramway électrique qui figura à l'Exposition de 1881 ; nous aurons à en parler à propos de celui-ci.

A Lichterfelde se manifesta pour la première fois une difficulté inhérente à ce genre de transport de la force ; nous

voulons parler de la variation continue de la résistance interposée entre les deux machines. Au départ, la machine réceptrice est tout près de la machine génératrice ; à mesure qu'elle roule, une longueur de rails de plus en plus grande s'allonge entre les deux, en sorte que les conditions dans lesquelles le transport se fait sont continuellement variables et progressivement plus désavantageuses. Dans les chemins très courts cet inconvénient n'est pas sensible ; dans le chemin de Lichterfelde, il fut peu saillant à cause de la grande section des rails employés comme conducteurs, et de leur très faible résistance électrique ; néanmoins il put être aperçu. Il deviendrait très sensible avec l'emploi de conducteurs aériens tels que celui que nous venons de figurer, conducteurs dont la dimension serait forcément restreinte et la résistance relativement considérable. Nous verrons plus loin que le moyen de surmonter cet obstacle réside dans un emploi convenable de l'électricité et dans la mise en usage de tensions élevées.

Si les applications de l'électricité aux chemins de fer exécutées par la maison Siemens et Halske sont de beaucoup les plus nombreuses et les plus importantes, elles ne sont cependant pas les seules ; il convient de citer l'expérience faite par M. Edison dans son laboratoire de Menlo-Park ; il n'y a du reste aucun détail particulier à fournir sur cette expérience, elle reproduit à peu près identiquement les dispositions employées dans l'expérience de Berlin décrite dans ce chapitre.

Des essais du même genre ont été exécutés en France par MM. Chrétien et Félix en faisant usage de la machine de M. Gramme ; nous les retrouverons à l'Exposition d'électricité où ils ont figuré et à propos de laquelle nous aurons à les décrire.

Au reste il faut, avant d'en venir à cette Exposition, mentionner quelques autres applications. La maison Siemens et Halske avait installé à Mannheim un ascenseur. Nous le citons ici pour prendre date, car nous le

retrouverons plus complet et sous une forme plus élégante à l'Exposition de Paris; les dispositions essentielles étant restées absolument les mêmes, il sera plus convenable de décrire ce dernier.

A la sucrerie de Sermaize, MM. Félix et Chrétien ont fait usage du transport électrique pour divers engins, en particulier pour des grues de déchargement. Dans les usines de ce genre les travaux très actifs ne se font qu'à une époque de l'année; pendant les autres mois, la machine centrale est presque en repos; il y a alors utilité sérieuse à pouvoir disposer de sa puissance en d'autres points qu'à l'usine, par exemple sur les quais d'arrivage. L'appareil est d'ailleurs très simple comme on le voit par la figure 100.

C'est une grue, formée d'un long bras de levier placé en bascule et portant une chaîne à godets ou à plateaux. Une machine électrique du type de Gramme est placée sur le bâti roulant qui porte le système. L'extrémité supérieure du levier est munie d'un contrepoids et rattachée par une corde ou une chaîne à un treuil relié à la machine électrique. On amène l'ensemble en face du bateau à décharger; le treuil est mis en mouvement et laisse descendre le levier jusqu'à ce que son bras inférieur plonge dans le bateau. On amarre alors le levier, et on embraye la machine électrique avec la chaîne à godets dont le mouvement fait monter les betteraves à décharger et les déverse dans les wagons disposés pour les recevoir.

Plusieurs appareils de ce genre sont disposés sur le quai et chacun d'eux est ainsi à la disposition des travailleurs par la simple manœuvre d'un commutateur.

Un dispositif analogue plus complet a été installé par M. William Siemens dans une ferme en Angleterre. Dans cette exploitation une machine locomobile installée dans les bâtiments centraux met en jeu une machine dynamo-électrique du type Siemens et Halske. Les divers points où les travaux doivent avoir lieu sont reliés avec cette



Fig. 100. — Grue électrique de la Sucrerie de Sermaize.

usine centrale par des fils conducteurs les uns à demeure, les autres volants installés selon le besoin. Des machines dynamo-électriques sont disposées au point où l'on veut travailler; soit qu'il s'agisse d'un labour dans un champ, d'un battage à opérer en grange, de tout autre travail exécuté par une machine-outil, on l'obtient simplement et immédiatement en reliant l'appareil avec le fil conducteur : dans tous les points de l'exploitation agricole on a ainsi constamment à sa disposition la force qui se produit au même instant dans le bâtiment central sous l'action de la machine à vapeur : ajoutons que le courant électrique ainsi engendré est employé le soir à fournir de l'éclairage, et on en a fait usage pour des expériences fort intéressantes dans lesquelles on a étudié l'action de la lumière électrique sur le développement de la végétation.

VI. — TRANSPORT DE LA FORCE A L'EXPOSITION D'ÉLECTRICITÉ DE 1881.

Applications diverses du transport de la force. — Exposition Chrétien et Félix. — Atelier Ducommun. — Exposition Siemens. — L'ascenseur. — Le tramway.

L'Exposition d'électricité qui eut lieu à Paris en 1881 et qui fut si brillante, renfermait de très nombreux exemples de transport électrique du travail mécanique. On ne peut dire cependant qu'elle ait rien révélé de nouveau sur ce point, sauf une réserve en ce qui concerne l'exposition de M. Marcel Deprez dont nous parlerons à part.

Pour tous les autres : nous trouvons des transports analogues à ceux dont nous avons déjà parlé, c'est-à-dire opérés à petite distance à l'aide de machines rentrant dans les types connus. Même à ce dernier point de

vue il n'y eut à peu près aucune trace d'innovation; tous les transports opérés, sauf la réserve indiquée ci-dessus, le furent à l'aide des deux types de machines dont il a été parlé dans les chapitres précédents, c'est-à-dire la machine de Gramme ordinaire et la machine connue de Siemens. Parmi les très nombreuses formes nouvelles de machines qui furent produites à cette Exposition, aucune ne fut appliquée à cette destination. L'étude du transport de la force par l'électricité tel qu'il fut produit à l'Exposition se réduirait donc à une brève et sèche énumération, s'il y avait à noter chez quelques exposants des particularités assez intéressantes, encore sont-elles en petit nombre.

Pour se débarrasser de suite des moins importants, nous rappellerons que plusieurs maisons avaient exposé des ateliers de machines à coudre conduites par des machines électriques. Tous étaient disposés de la même façon; qu'ils fussent exhibés par l'un ou par l'autre, par la maison de la *Ménagère* ou par la maison Baclé, par M. Bariquand ou par MM. Hurtu et Hautin, l'arrangement était le même; c'était toujours un certain nombre de machines à coudre mécaniquement réunies à un même arbre de commande; une machine dynamo-électrique mettait cet arbre en mouvement, et les machines à coudre agissaient. Dans toutes les expositions que je viens de citer la machine Gramme était employée.

Il en était de même dans les machines-outils de MM. Donnay, Huré, Mouchère; la machine mise en mouvement variait, c'était un tour, une raboteuse, etc., mais toujours animée par une machine de Gramme, recevant le courant d'une autre machine semblable, placée à quelque distance dans le palais de l'Industrie.

Parmi les expositions de ce genre, il convient de citer en tête celle de MM. Heilmann, Ducommun et Steinlen de Mulhouse. Ces messieurs avaient installé, d'une part une véritable batterie de machines Gramme, actionnées par

des moteurs à vapeur, et de l'autre un atelier sérieux de machines-outils destinées à travailler le fer, conduites par un arbre de commande mené par d'autres machines de Gramme recevant le courant des premières. La distance du transport était du reste, comme dans les autres exemples cités, très petite; elle ne dépassait pas une centaine de mètres.

Il faut aussi donner une mention à l'installation de MM. Geneste et Herscher : là, une seule machine génératrice servait à actionner trois machines réceptrices. C'était une sorte de vague essai de distribution de l'électricité, bien peu complet sans doute, mais néanmoins intéressant, et qu'il convient de remarquer comme ayant quelque originalité.

Nous venons aux expositions où le transport de la force par l'électricité était un objet spécial de démonstration. Nous parlerons d'abord de celle de MM. Chrétien et Félix. Ils avaient reproduit à l'Exposition d'électricité le labourage électrique, exécuté par eux à Sermaize, et dont nous avons déjà parlé; il n'y a pas lieu d'y revenir, les appareils étant absolument conformes à la description que nous avons donnée : ils y avaient joint un appareil nouveau, constituant une sorte de chemin de fer. A vrai dire, c'était plutôt un chariot à peu près semblable à un tender de locomotive dont les roues étaient mises en relation par une chaîne Galle, avec une machine de Gramme placée dans le véhicule; le courant amené par l'un des rails revenait par l'autre, comme cela se fait dans le chemin de fer de Lichterfelde que nous avons décrit ci-dessus.

La maison Chrétien et Félix exposait en même temps une série de machines-outils; par exemple, une scierie à bois où les scies étaient mises en mouvement par une machine de Gramme; une pompe rotative dont l'axe était relié directement avec celui d'une machine de Gramme, du type octogone. Enfin, on regardait particulièrement une haveuse atmosphérique; la haveuse est un appareil

destiné à découper et à détacher les blocs de pierre dans la carrière; à cet effet, elle porte une sorte de lame de ciseau solide, mise rapidement en mouvement alternatif, et frappant sur la pierre, au point où l'on veut la creuser, une série de coups rapides. Cette opération s'accomplit par l'intermédiaire de l'air comprimé, afin que le choc soit plus élastique; la machine électrique servait, dans le cas actuel, à imprimer au piston le rapide mouvement alternatif qui met l'appareil en jeu. On pouvait remarquer aussi un marteau à planer ou à marteler, frappant très rapidement et mû directement par une machine de Gramme. Cette exposition, comme on le voit, était importante par son étendue et le nombre des objets exhibés, mais elle n'apportait rien en somme qui n'eût été vu déjà en France. La distance de transport était à peu près égale à la largeur du palais de l'Industrie.

L'exposition de la maison Siemens et Halske était plus originale; à la vérité, il faudrait dire les expositions : cette maison puissante exposait sous sa raison sociale dans la section allemande, dans la section française sous la rubrique de sa succursale de Paris, en Angleterre au nom de M. William Siemens, frère du directeur principal, M. Werner Siemens. Elle avait installé dans la section française un atelier de machines-outils assez intéressant; on y trouvait d'abord les mêmes machines que chez les autres, tours, raboteuses, pompes rotatives, et de plus un bac à galvanoplastie. Sur ce point, une remarque importante doit être faite. Nous avons dit déjà que pour transmettre la force le plus économiquement et le plus commodément possible, il y a intérêt à employer de l'électricité de forte tension, afin d'en employer une moindre quantité : l'inverse a lieu pour la galvanoplastie. L'expérience montre que pour obtenir des dépôts de métal, plus l'électricité est à basse tension, mieux cela vaut. Il s'ensuit que l'électricité dont on se sert pour transmettre la force n'est pas bonne pour opérer le cuivrage ou la dorure galvaniques :

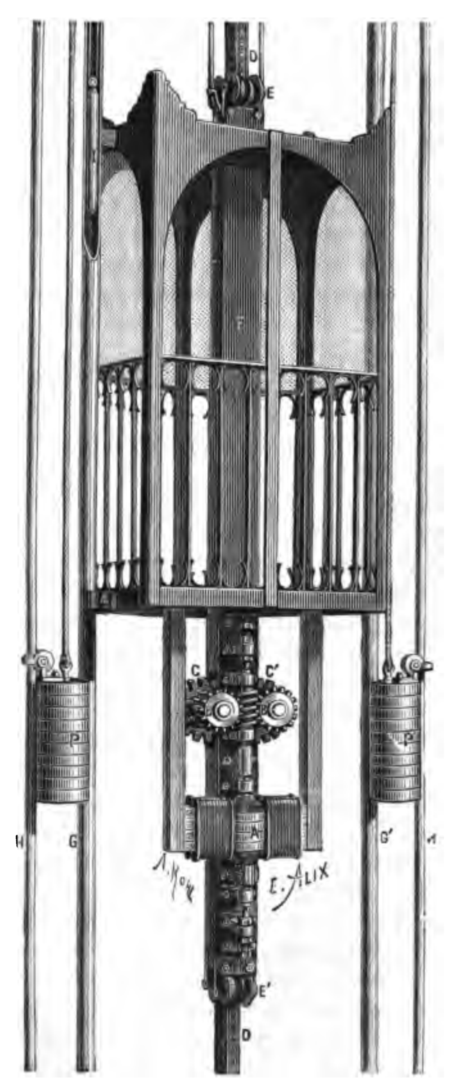


Fig. 101. — Ascenseur électrique de l'Exposition de 1881.

on obvie à ce défaut par un artifice; l'électricité envoyée par la machine centrale est employée non à déposer du métal, mais à faire tourner une machine dynamo-électrique, et celle-ci à son tour à l'aide d'une courroie ou d'une transmission met en jeu une autre machine électrique; c'est cette dernière qui fournit l'électricité au bain galvanique, et on a soin de la disposer de façon que l'électricité qui s'en échappe soit dans les conditions convenables. Il est bien vrai que par ces multiples transformations d'électricité en force et de force en électricité, on subit des pertes considérables, mais le résultat est atteint, ce qui n'aurait pas lieu par l'action directe de l'agent électrique tel qu'il doit être produit pour le transport de la force.

La maison Siemens avait en outre exposé deux appareils très intéressants; le premier, qui ne fut prêt que tout à la fin de l'Exposition, était un ascenseur que nous représentons figure 101. L'appareil se composait d'un montant vertical DD portant des dents, ou pour être plus précis, d'une sorte d'échelle étroite présentant des barreaux très rapprochés : deux roues d'engrenage C, C′ engageaient leurs dents entre les barreaux de cette échelle. Ces roues, par l'intermédiaire d'une vis sans fin, étaient en rapport avec une machine dynamo-électrique A. Lorsque cette dernière recevait le courant, elle entrait en rotation, mettait en mouvement les roues, et celles-ci engrenant avec la crémaillère verticale forçaient tout le système à s'élever. Une plate-forme était fixée à ce mécanisme, et se déplaçait avec lui, emportant ainsi les personnes qui s'y trouvaient montées. Le courant nécessaire à la manœuvre était fourni par une machine disposée dans le palais à quelques centaines de mètres de l'appareil. Un ascenseur du même genre avait du reste été exhibé une année auparavant à l'Exposition de Mannheim.

Cette application de l'électricité était curieuse et intéressante surtout parce qu'elle était nouvelle; à la

regarder de plus près diverses critiques auraient pu lui être adressées, spécialement en ce qui concerne le mécanisme qui absorbait beaucoup de force.

Une application moins neuve, mais à beaucoup d'égards plus intéressante, était le tramway électrique que la maison Siemens avait installé et faisait circuler entre le palais de l'Industrie et la place de la Concorde. La disposition générale se rapprochait de celle adoptée pour le chemin de fer de Lichterfelde; en particulier le véhicule était absolument le même comme on peut voir par la figure 102 ci-jointe; mais certains détails importants différaient. On se souvient qu'à Lichterfelde le courant était amené par l'un des rails et ramené par l'autre; pour cela les rails, légèrement exhaussés au-dessus du sol, étaient soutenus et électriquement isolés par des blocs de bois. On avait d'abord pensé faire usage à Paris d'une disposition analogue, et le petit chemin de fer devait s'élever à une certaine hauteur supporté par un bâti en bois et fer. L'autorisation d'exécuter ce travail arriva, dit-on, trop tard; il y a lieu de douter qu'elle ait même été accordée; la disposition des lieux était telle qu'un chemin de cette nature eût gravement entravé la circulation des voitures, et cela est si vrai qu'on ne permit même pas de mettre les rails en relief sur le sol; on obligea à se servir, au lieu de rails, d'ornières en fer comme dans les autres tramways ordinaires de Paris, afin qu'aucune saillie ne vint modifier le profil de la voie. Les conditions étaient alors complètement changées, et il ne pouvait plus être question d'amener le courant par les rails, ceux-ci ne pouvant être isolés. On résolut alors d'installer un conducteur spécial pour amener le courant; celui-ci devait ensuite descendre par les roues et revenir par les rails et la terre. A l'essai, une nouvelle difficulté se présenta, les rails étant au niveau du sol étaient couverts de boue et de poussière; on s'aperçut bientôt que cette couche suffisait à empêcher la commu-

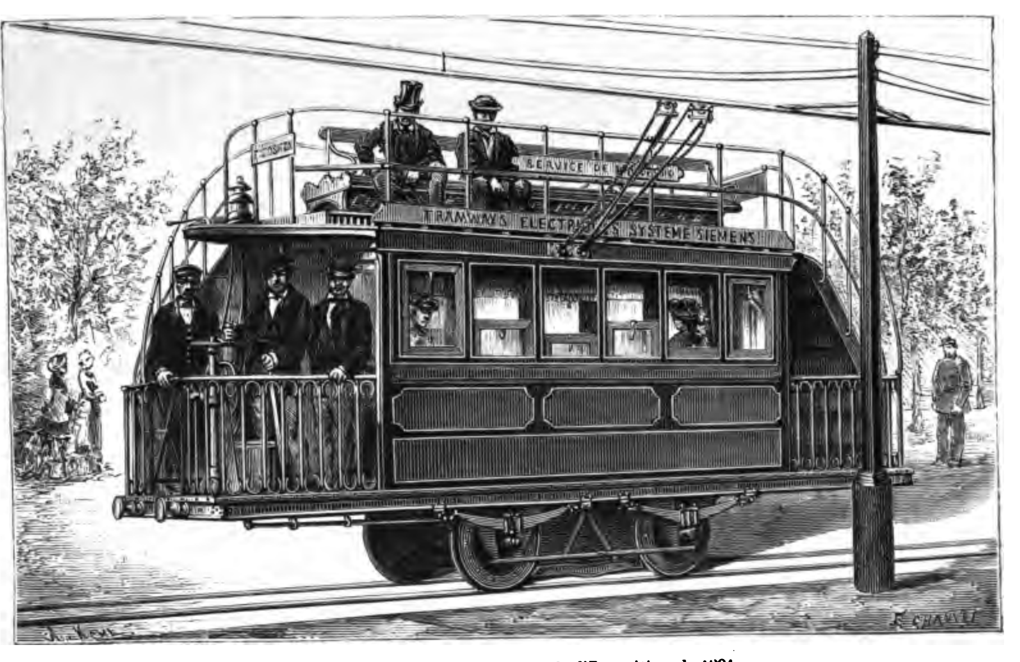


Fig. 102. — Tramway électrique de l'Exposition de 1881.

nication entre les roues et les rails, en sorte que le retour du courant s'opérait fort mal. Il fallut se décider à disposer un conducteur pour l'arrivée et un pour le retour du courant.

Après des études et des tâtonnements, ces conducteurs furent formés de deux tubes de cuivre fendus suivant leur longueur et fixés le long d'une petite pièce de bois suspendue horizontalement à des poteaux plantés le long de la voie. Le frotteur mobile qui devait relier le véhicule à ces tubes fut assez délicat à établir; on s'arrêta à la forme indiquée figure 103. Le contact était, comme on le

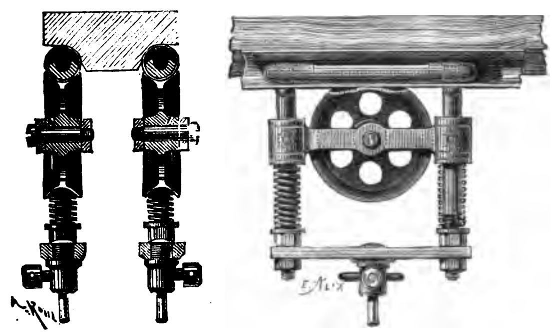


Fig. 103. — Contacts roulants du tramway Siemens.

voit, opéré par un rectangle dont un des côtés, placé dans le tube, était relié aux autres à travers la fente longitudinale de celui-ci; un galet, ou sorte de petite roue, roulait sur le tube et était poussé contre lui par des ressorts, en sorte que le contact opéré d'une part par la pièce glissant dans le tube, de l'autre par le galet roulant à l'extérieur, était toujours suffisant; chacun des deux tubes conducteurs portait un chariot de ce genre, et ces chariots étaient reliés au véhicule par des câbles contenant les fils conducteurs; le courant venait à la machine par l'un d'eux et revenait par l'autre. Ce système a fonctionné

d'une façon suffisante pendant toute la durée de l'Exposition. Le véhicule aurait pu marcher avec une vitesse d'environ 70 kilomètres à l'heure; en fait il n'a jamais dépassé une vitesse d'environ 20 kilomètres, le peu de longueur de la course parcourue et la raideur des courbes ne lui permettant pas de faire plus. Il a cependant apporté à tous une preuve nouvelle de la praticabilité des chemins de fer électriques.

En dehors de ces expositions il convient de citer celle de M. Gravier de Varsovie, et celle de M. Marcel Deprez; mais il sera question plus loin de ces deux expositions où la question du transport de la force se compliquait d'une autre bien plus vaste et plus importante, celle de la distribution de la force : ces deux expositions indiquaient deux solutions de cette question, solutions de valeurs très inégales, il est vrai, celle de M. Gravier étant très élémentaire, tandis que celle de M. Marcel Deprez est de grande conséquence. Nous aurons bientôt à nous en occuper de façon plus spéciale.

VIII. — APPLICATIONS ET EXPÉRIENCES RÉCENTES.

Applications faites à La Rochelle, à Bourges. — Blanchisserie du Breuil-en-Auge. — La Belle Jardinière. — Le monte-charge du chemin de fer du Nord. — Projets de chemins de fer électriques à Paris et à Berlin. — Exposition de Munich. — Expériences de Marcel Deprez à Munich, — Lois du transport des forces. — Les hautes tensions. — Les grandes machines.

L'Exposition d'électricité, bien qu'elle ne renfermât pas de progrès très marquants sur ce qui avait été fait déjà dans le sens du transport électrique de la force (sauf les réserves déjà signalées), eut cependant pour cette question la même influence heureuse que pour les autres; elle fit connaître à tous les solutions acquises, vulgarisa les procédés. Depuis qu'elle s'est terminée plusieurs applica-

tions intéressantes du transport de la force ont été faites. A La Rochelle deux machines de Gramme octogones servent à amener dans la ville une partie de la force d'une chute d'eau qui en est éloignée d'environ 3 kilomètres; la machine réceptrice fait mouvoir une pompe rotative qui fournit l'eau à un quartier de la ville : cette installation est donc en tout semblable à celles que nous avons signalées dans le chapitre précédent à propos de l'Exposition, seulement, il ne s'agit plus d'une démonstration mais d'une application réelle, ce qui est quelquefois bien différent. Le système qui est en place depuis plus d'une année n'a pas cessé de bien fonctionner.

A la fonderie de canons de Bourges, on installe actuellement un transport de force assez curieux : il s'agit d'une grue roulante. Cet appareil, comme on le sait, se déplace sur des rails et doit pouvoir agir en tous les points de son parcours : on lui adjoint généralement un moteur à vapeur qu'il transporte avec lui. A Bourges on voulait une grue très puissante capable de développer un travail de douze chevaux vapeur environ; une machine de cette force est fort lourde et il devenait, sinon impossible, du moins difficile et incommode de la joindre à la grue; d'ailleurs on avait de la force en trop dans un atelier distant de 200 à 300 mètres de celui où devait fonctionner la grue. La solution électrique se présentait, les officiers l'ont intelligemment acceptée et l'appareil va entrer en fonction. D'après les projets, le courant amené par un conducteur spécial reviendra par les rails, Les machines sont du type Gramme appliqué par MM. Chrétien et Félix.

A côté de ces exemples, nous en citerons un qui est dans des conditions particulières. A la blanchisserie du Breuil-en-Auge, près Lisieux, dont le propriétaire est M. Duchesne-Fournet, on emploie l'électricité au ramassage des toiles. On sait que pour le blanchissage et le séchage on étend les pièces de toile sur l'herbe des prairies, il faut répéter cette manœuvre plusieurs fois.

M. Dupuy, ingénieur de cette maison, a fait installer en tête des prairies un petit chemin de fer. Le train qui roule sur cette voie comprend d'abord deux fourgons. Le premier renferme des accumulateurs électriques du système Faure : nous n'avons pas eu occasion de parler de ces appareils qui ont fait récemment beaucoup de bruit ; nous dirons seulement que le système Faure est une modification d'une invention importante due à M. Gaston Planté ; c'est ce dernier qui a trouvé le moyen de créer un appareil dans lequel l'électricité peut être déposée, emmagasinée en grande quantité, et qui permet de la récupérer au moment où l'on en a besoin. Le fourgon renfermant les accumulateurs représente donc la source d'électricité. Derrière lui vient le fourgon qui renferme le moteur et que nous représentons figure 104. C'est une machine du type Gramme qui est employée. Elle est reliée d'une part avec les roues du fourgon, de l'autre avec une sorte de dévidoir. Derrière ce fourgon sont disposés les wagonnets portant les paniers où doivent être recueillies les toiles. La manœuvre s'opère de la façon suivante : on envoie le courant des accumulateurs dans la machine, et le train se met en marche ; lorsque l'on est arrivé à la première bande de toile, on fait agir un levier représenté à part figure 105 qui a pour double fonction de couper le courant et de serrer le frein des roues. On engage alors l'extrémité de la bande de toile dans le dévidoir ; on embraye celui-ci avec le moteur électrique, et on envoie le courant : le dévidoir entre en jeu et fait monter la longue bande de toile que l'on reçoit dans les caisses ou paniers des wagonnets : lorsqu'une bande est rentrée, on remet la machine sur les roues et on s'avance jusqu'à la bande suivante.

Cette disposition est évidemment médiocrement avantageuse ; les accumulateurs sont fort lourds, il en faut environ 800 kilos, ce qui constitue un poids mort considérable ; en agissant comme on le fait, on perd l'avantage

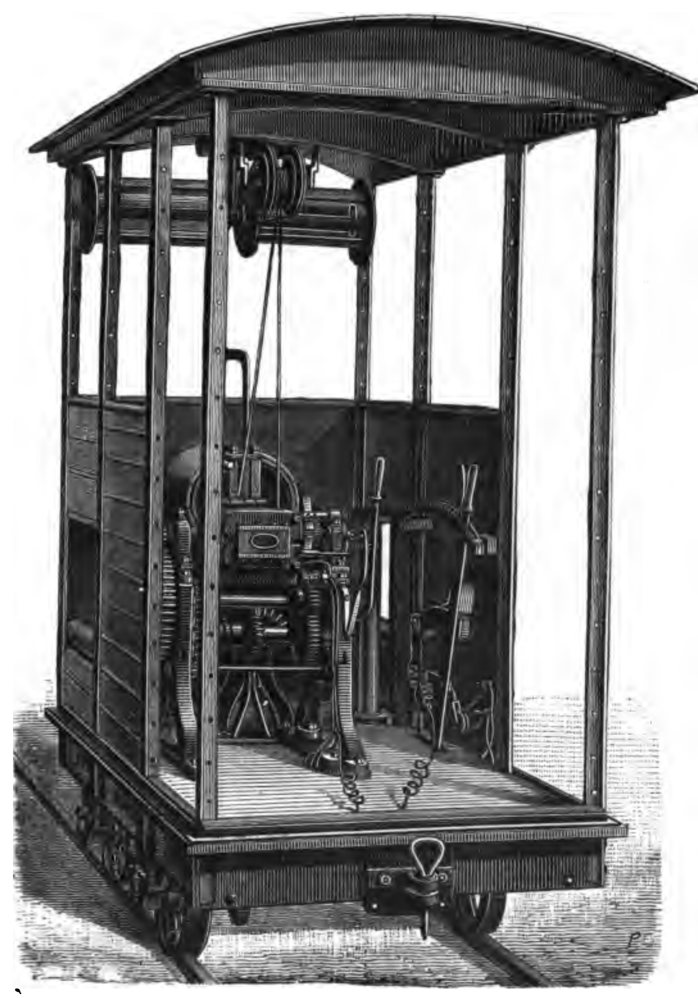


Fig. 104. — Locomotive électrique de M. Dupuy.

principal de l'électricité, qui est de venir de loin apporter la force, ainsi que nous l'avons remarqué ; dans l'installation dont nous parlons, on n'utilise que l'aptitude de l'agent électrique à produire le travail et non sa facilité à

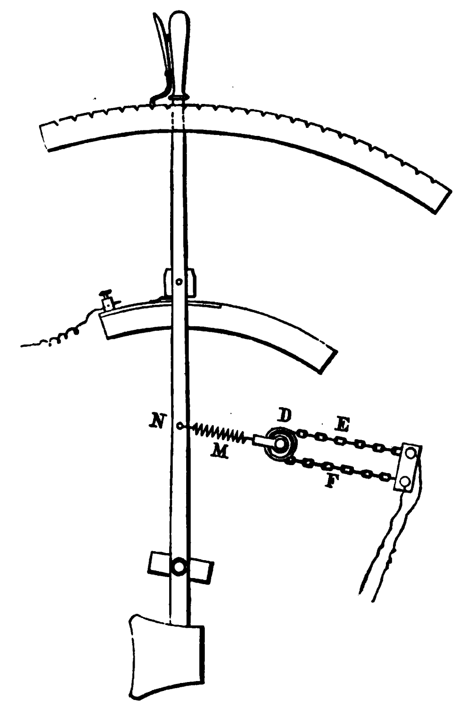


Fig. 105. — Serre-frein commutateur de la locomotive Dupuy.

le transporter : mais dans ce cas, la disposition adoptée était commandée par diverses circonstances.

En premier lieu, l'électricité s'imposait. Les machines à vapeur doivent être absolument écartées des prairies à blanchiment, leur fumée tache les toiles d'une façon désastreuse : d'autre part les prairies sont très humides, on a bientôt reconnu qu'il était impossible d'isoler les rails,

ceux-ci ne pouvaient donc servir de conducteurs électriques, au moins pour amener le courant : il eût donc fallu un conducteur spécial comme dans le tramway de l'Exposition : on a préféré les accumulateurs qui ont semblé moins coûteux, et dont le poids n'était pas un gros inconvénient, le train ne devant jamais aller vite. Ajoutons qu'on y trouvait l'avantage de pouvoir charger tranquillement ces accumulateurs à l'usine avec la force perdue du moteur. Cette application vient, du reste, d'être faite de nouveau dans une blanchisserie de Berlin.

Nous représentons figure 106 une locomotive électrique dite de Murchisson, dans laquelle la force motrice est produite par un simple électromoteur à mouvements alternatifs, actionné par un accumulateur Planté qui, dans la figure, est en train d'être rechargé à la station de départ. M. de Graffigny, dans son livre intitulé *les Moteurs anciens et modernes*, la présente comme supérieure à celle de Siemens essayée à l'Exposition de Berlin, mais nous ne pouvons partager en rien cette opinion ni celle qu'il exprime sur les accumulateurs dont il ne paraît pas avoir bien compris le principe. Suivant cet auteur, la vitesse de la machine pourrait être modifiée en faisant varier l'intensité du courant, et on pourrait même l'arrêter presque immédiatement en dirigeant le courant sur les roues qui seraient disposées pour pouvoir s'aimanter et avoir leur vitesse ralentie par leur adhérence énergique avec les rails. Bien plus même les wagons seraient reliés les uns aux autres, dans ce système, par des tampons aimantés qui permettraient ainsi leur disjonction instantanée; on pourrait même avec l'excédent du générateur, allumer une lampe électrique pendant la nuit pour en éclairer la marche. Ces dispositions d'une complication bien inutile sont d'ailleurs tout à fait invraisemblables et demanderaient une sérieuse vérification; elles n'ont été signalées nulle part, ce qui oblige à les révoquer absolument en doute.

Dans ces derniers temps on a appliqué encore les machines d'induction à la marche des navires, et les journaux du mois d'octobre 1882 étaient remplis d'expériences faites le 28 septembre sur la Tamise à l'aide d'un canot construit par l'*electrical power storage company*, embarcation qui était actionnée par des machines Siemens. Ce canot, auquel on avait donné le nom d'*Electricity*, avait 7^{m},62 de longueur, 1^{m},52 de largeur, et un tirant d'eau de 0^{m},52 à l'avant, 0^{m},75 à l'arrière; il était donc

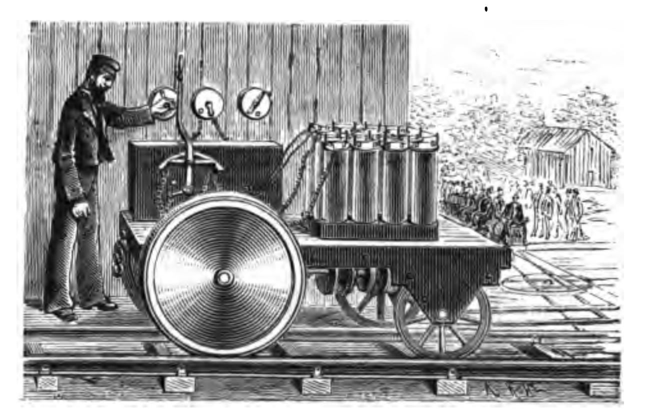


Fig. 106. — Locomotive électrique de Murchisson.

presque aussi grand que celui de Jacobi. Nous en donnons la coupe figure 107.

L'appareil moteur, composé de deux machines M M′ du type D^{5}, était placé sous la cabine, c'est-à-dire dans la partie centrale du bâtiment, un peu vers l'arrière. Les courroies des deux machines agissaient sur une même poulie de renvoi P qui elle-même mettait en mouvement une autre poulie R placée sur l'axe de l'hélice. Cette dernière était construite pour faire 350 tours par minute, alors que les machines en faisaient 950.

Le courant était fourni aux moteurs par 45 accumula-

teurs Sellon-Volkmar A A de quarante lames dont le poids était de 816 kilogrammes et la force électromotrice de 96 volts. On a prétendu que ce générateur électrique pouvait fournir une intensité de courant de plus de 30 ampères, ce qui permettait d'obtenir une force de 4 chevaux pendant 6 heures. L'appareil était complété par un commutateur permettant de faire varier le nombre des accumulateurs. En outre, une disposition mécanique donnait la facilité d'exclure l'un ou l'autre des moteurs,

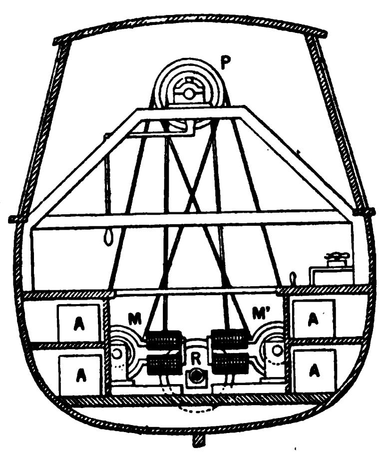


Fig. 107. — Le bateau électrique l'*Electricity*.

qui étaient d'ailleurs disposés de manière qu'on pût renverser le sens de leur rotation. On avait de cette manière toute facilité pour arrêter rapidement le bateau et de le faire aller en arrière. La personne qui était placée dans la cabine pour manœuvrer le commutateur menait aussi le gouvernail. Quant au sifflet que l'on trouve dans les bateaux à vapeur ordinaires, il était remplacé par une forte sonnerie alimentée également par les accumulateurs.

L'*Electricity* pouvait contenir 12 personnes, mais

dans les expériences faites sur la Tamise entre London-Bridge et Milwall, quatre seulement y ont pris place. La vitesse moyenne à laquelle on a marché était de 9 milles à l'heure contre le courant, chiffre recueilli d'après les renseignements fournis par les expérimentateurs.

Plusieurs petites installations doivent encore être citées, nous signalerons celle de la Belle Jardinière. Dans ce grand établissement de confection, il existe à l'étage supérieur un atelier de machines à coudre; on désirait mettre en mouvement ces appareils à l'aide d'un moteur; mais les machines étant dans le sous-sol du bâtiment, la transmission mécanique était très difficile, l'électricité a résolu le problème : une machine Gramme en bas, une autre en haut, deux conducteurs, et la transmission est opérée. On est ainsi parvenu à éviter aux ouvrières la manœuvre de la machine à coudre qui est fort pénible et même gravement nuisible à la santé quand elle est trop prolongée.

Des applications de ce genre existent également dans les grands magasins du Louvre, l'une d'elles au moins est même peut-être antérieure à celle de la Belle Jardinière; il s'agit d'un transport de force opéré entre les magasins et un atelier placé rue de Valois : le fil traverse la rue Saint-Honoré, et le courant qu'il conduit va mettre en mouvement un ensemble de machines à découper et à coudre. Le même moyen est employé dans des ateliers annexes placés avenue Rapp; un atelier de machines à coudre reçoit électriquement le mouvement d'une machine à vapeur placée à quelque distance.

Une application très intéressante vient aussi d'être réalisée dans la gare de marchandises du chemin de fer du Nord. En parlant de l'Exposition d'électricité nous n'avons pas signalé un petit treuil électrique exposé dans la section anglaise; il était fort simple d'ailleurs; une machine du type Siemens, suivant le sens du courant qui lui était trans-

mis, enroulait ou déroulait une chaîne sans fin et pouvait ainsi soulever ou laisser descendre des fardeaux. L'appareil installé à la gare du Nord par la maison française Siemens est analogue, seulement il est pourvu de plus d'un mouvement de translation qui en fait une véritable grue roulante. Aux poutres de la halle aux marchandises sont fixées et suspendues des ornières de fer formant rails. Sur ces rails repose une caisse formant chariot et renfermant une machine Siemens reliée à un treuil. Au-dessus de ce système courent des tubes de cuivre formant conducteurs; ils sont tout à fait analogues à ceux que nous avons décrits à propos du tramway de l'Exposition et renferment comme ceux-ci des contacts glissants. A l'aide d'une chaîne de manœuvre on donne le courant à la machine et on la relie tantôt au treuil au moyen duquel elle soulève les fardeaux, tantôt aux roues du chariot à l'aide desquelles elle se transporte du point de chargement au lieu de déchargement et vice versa. L'électricité est fournie par deux machines de Gramme placées à environ 350 mètres. Le fonctionnement du système a complètement satisfait. Il faut s'attendre à en voir prochainement beaucoup d'analogues.

A côté de ces applications, de nombreux et importants projets ont été élaborés et proposés : on ne sait encore ce qui en sortira comme exécution, il est néanmoins intéressant d'en dire quelques mots. Nous avons déjà parlé du chemin de fer projeté à Berlin, les dispositions en sont très analogues avec celles que MM. Chrétien et Félix ont étudiées pour un chemin de fer à établir sur les boulevards de Paris, entre la Madeleine et la Bastille. Nous donnerons donc quelques détails sur ce dernier projet, qui est très complet.

La ligne est construite dans toute sa longueur en viaduc à deux voies, formé d'une structure de fer reposant sur une seule ligne d'appuis médians : l'étendue occupée dans l espace est réduite autant que possible ; l'élévation

normale est de 5 à 7 mètres au-dessus du sol; il n'y a pas de croisements ni de changements de voie. Les gares où se font les changements de train, bifurcations, et où sont en général concentrées toutes les manœuvres sont étudiées avec beaucoup de soin. L'aspect général est donnée par la figure 108. La force motrice est produite par des machines à vapeur fixes, installées dans des conditions spéciales et qui font tourner des machines



Fig. 108. — Projet de chemin de fer électrique sur les boulevards.

dynamo-électriques Gramme, lesquelles produisent l'électricité. Celle-ci est conduite par des fils de cuivre le long de la voie. Chaque voiture porte une machine qui reçoit l'électricité et donne le mouvement conformément aux systèmes que nous avons déjà décrits. L'auteur du projet se propose, pour le trajet compris entre la Madeleine et la Bastille, de créer deux centres de production électrique. Les voitures, analogues aux voitures-tramways que

nous avons déjà représentées, auraient 8 mètres de longueur et offriraient 50 places; on ne formerait point de trains; les voitures circuleraient isolément et auraient des départs très fréquents, comme les omnibus. Comme on le voit, tous les détails du projet ont été étudiés, le côté financier n'a pas été négligé; on a même fait une demande tendant à obtenir une concession; il est cependant bien douteux que ce projet soit jamais exécuté, au moins à Paris, puisque dans cette ville on semble se décider pour un chemin de fer souterrain. L'étude n'en est pas moins bonne à connaître, et de semblables chemins seront certainement installés un jour ou l'autre.

Une récente Exposition d'électricité, celle qui vient d'avoir lieu à Munich, a montré que la question était de plus en plus à l'ordre du jour : des expériences très intéressantes y ont été faites. Quelques-unes ne s'écartaient pas des dispositions déjà connues, et n'apportaient pas de particularités nouvelles. Ainsi la maison Edison avait installé une sorte d'atelier de laiterie où les outils étaient liés à un arbre de couche conduit par une machine Edison recevant son courant d'une autre machine semblable placée à quelque distance; cette distance n'était, du reste, que de quelques mètres. M. Schuckert exposait des outils agricoles tournant à vide sous l'action d'une machine électrique, seulement ici la machine génératrice était placée à 5 kilomètres de distance et était mise en mouvement par les chutes de l'Hirschau. La distance du transport était donc de quelque importance sans cependant excéder des limites déjà atteintes. Il faut dire que les fils conducteurs qui reliaient les deux machines étaient en cuivre et avaient un diamètre de $0^{m},0045$. Cette circonstance doit être notée, car il faut remarquer que la distance qui sépare les machines n'est pas en elle-même l'obstacle; la difficulté réside, ainsi que nous l'avons déjà dit, dans la résistance que l'électricité rencontre le long du conducteur qu'elle doit parcourir pour aller d'une station à

l'autre : cette résistance augmente avec la longueur du fil, c'est pourquoi l'augmentation de la distance est un obstacle, mais elle diminue lorsque la grosseur du fil augmente, elle diminue aussi lorsque le métal du fil se prête mieux qu'un autre au passage de l'électricité et possède ce qu'on nomme une meilleure conductibilité. Or, chacun sait que le cuivre est beaucoup meilleur conducteur que le fer, et c'est ce dernier métal qui est employé pour la construction des fils télégraphiques; si l'on compare la conductibilité de ces deux métaux, on trouve que dans l'expérience Schuckert, le conducteur en cuivre de 5 kilomètres équivalait à 770 mètres de fil télégraphique, c'est-à-dire que si on avait employé ce dernier fil, il eût fallu rapprocher les machines jusqu'à 770 mètres pour se trouver dans les mêmes conditions de fonctionnement. Cette considération est très importante, car ce qui incommode dans le transport de l'électricité, c'est la difficulté d'installation du conducteur. Si l'on pouvait, entre deux stations, si éloignées qu'elles soient, placer une grosse barre de cuivre rouge, l'électricité irait de l'une à l'autre presque sans difficulté et la distance ne compterait presque pas, mais précisément cette installation comporterait une dépense énorme, hors de toute proportion avec les résultats utiles que l'on pourrait attendre d'un tel transport. C'est cette question de dépense qui est en définitive déterminante : si en effet on se propose de faire des transport de force par l'électricité, c'est pour en tirer parti, et cela devient impraticable si l'installation est par trop coûteuse. Or, dans ces installations, le conducteur qui doit réunir les stations extrêmes est une des dépenses principales; il y a donc un intérêt majeur à le construire le plus fin possible et avec le métal le moins coûteux.

A ce point de vue, comme du reste à d'autres que nous allons signaler, l'expérience que M. Marcel Deprez installa à Munich est de la plus haute importance. Il trans-

porta un travail d'environ un demi-cheval-vapeur de la petite ville de Miesbach à la ville de Munich, située à 57 kilomètres de la première, en se servant pour ce transport de fils télégraphiques ordinaires en fer et d'un diamètre de $0^m,0045$. Ces fils étaient d'ailleurs installés et isolés à la manière en usage pour les circuits télégraphiques habituels ordinaires sans qu'il eût été pris pour eux aucune précaution spéciale. Ce résultat sort complètement de ce qui avait été fait et de ce que nous avons décrit jusqu'ici, il marque un pas très important et il convient d'y insister.

Dans le transport électrique du travail, non plus que dans aucun autre cas, nous ne créons rien, nous ne faisons que recueillir un travail né de quelque action spéciale : nous ne pouvons donc, dans chaque cas particulier, récolter que la quantité de travail engendrée dans ce cas. Cette quantité est limitée et doit pouvoir se mesurer. C'est, en effet, ce que nous savons faire pour les courants électriques. Si nous nommons E, ainsi que nous l'avons déjà fait, la force électromotrice qui fait naître le courant, et si nous désignons par I son intensité, la quantité d'énergie totale engendrée par ce courant, est représentée et mesurée par le produit E I. Nous cherchons à la convertir en un travail mécanique dont la valeur peut être représentée par la lettre T; si notre transformation était complète nous devrions recueillir en travail toute l'énergie du courant et nous pourrions écrire : $EI = T$.

Malheureusement cette équation est irréalisable. Il y a en effet un élément dont nous n'avons pas tenu compte. Pour avoir un courant électrique il faut un corps conducteur pour le porter; et cela surtout quand il y a transport, puisqu'il s'agit de le mener au loin; or, nous savons que tout corps conducteur oppose une résistance à l'électricité.

Ce que c'est précisément que la résistance des corps au mouvement électrique, nous l'ignorons, mais nous

savons que cette résistance se manifeste toujours par la naissance d'une certaine quantité de chaleur au passage du courant. Une loi découverte par M. Joule nous a appris à mesurer cette quantité de chaleur : si nous appelons R la résistance que l'électricité doit traverser, et I comme ci-dessus l'intensité de courant, la chaleur totale engendrée est mesurée par le produit RI^2; (I^2 est, comme on sait, le carré de I, c'est-à-dire le produit de I multiplié par lui-même).

Cette chaleur produite l'est aux dépens de l'énergie engendrée par le courant, et notre équation, pour être complète, devra s'écrire, $EI = RI^2 + T$.

Nous voyons immédiatement que le terme RI^2 s'introduit là au détriment de T, il représente pour nous une perte, et puisque nous ne pouvons le supprimer entièrement, nous devons chercher au moins à le réduire le plus possible. Le premier moyen c'est de réduire R. En examinant la constitution du système de transport, nous verrons que R comprend trois parties, la première, qui nous frappe immédiatement, c'est le conducteur métallique qui réunit la station de départ à la station d'arrivée. Nous avons déjà dit tout à l'heure quelle difficulté on rencontre à réduire la résistance de ce conducteur, cela devient une question de dépense et cette réduction est limitée par les conditions économiques à satisfaire. Les deux autres parties de R qui sont moins visibles d'abord, sont dans les machines elles-mêmes; nous ne devons pas oublier que ces appareils sont formés de fils enroulés que le courant doit parcourir et où il trouve des résistances; toutes choses égales d'ailleurs, il y aura intérêt à les réduire autant que possible.

Après avoir diminué R, il nous restera un autre moyen de diminuer le produit RI^2, c'est de diminuer I. Nous le pouvons sans doute, mais à une condition; en effet, si nous avons intérêt à diminuer RI^2 qui est la perte, nous ne devons pas toucher au produit EI, qui est l'énergie

dont nous disposons, il ne nous sera donc permis de diminuer I qu'à la condition d'augmenter en même temps E, afin que le produit EI ne s'abaisse pas. D'où nous voyons que pour obtenir un bon transport, nous sommes forcément amenés à employer des courants de petite intensité et de grande tension, résultat qui nous est déjà connu.

Il nous est possible d'aller plus loin. Nous avons déjà examiné au chapitre V comment fonctionnaient les machines dans le transport de la force. Une machine génératrice tournant avec une certaine vitesse envoie son courant à une autre machine, que nous supposerons pareille à la première; celle-ci se met en mouvement, et, si elle est libre tourne aussi vite que la première; dans ce cas, nous l'avons remarqué, le courant engendré sur le circuit est nul : pourquoi cela? L'explication est simple : la deuxième machine, en tournant, engendre de l'électricité comme fait la première, et tend à produire un courant qui marcherait en sens contraire du premier et qui le détruit dans une certaine proportion; si les deux machines marchent à égale vitesse, les deux courants sont égaux, ils se détruisent complètement, et rien n'apparaît sur le circuit; si au contraire l'une des machines va moins vite que l'autre, les courants contraires sont inégaux, il y a une différence qui se manifeste sous la forme d'un courant résultant plus ou moins fort. C'est ce qui arrive quand la deuxième machine est chargée de faire un travail, elle est ralentie par ce travail, et le courant se montre avec une intensité d'autant plus grande que le ralentissement est plus fort.

Nous devons donc considérer la machine réceptrice comme un producteur d'électricité travaillant sur le même circuit que l'autre, mais en sens contraire : elle est donc, comme la machine génératrice, le siège d'une force électromotrice, et de même que nous avons appelé la première E, nous appellerons la seconde *e*. Dans le système des deux machines que nous considérons il n'y a qu'un seul cou-

rant qui les parcourt toutes les deux, il n'y a donc qu'une seule intensité, celle que nous avons nommée I. Nous avons vu plus haut que l'énergie totale produite par la machine génératrice était EI, de même l'expérience et la théorie nous apprennent que l'énergie engendrée par la machine réceptrice est mesurée par la formule eI, c'est la somme de travail qu'elle peut produire, c'est la valeur de la quantité que nous avons jusqu'ici désignée par T, et notre équation prend enfin la forme complète :

$$EI = RI^2 + eI.$$

Il est très important de savoir quelle est la proportion de travail que l'on recueille, quel est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie totale produite ; ce rapport est, nous l'avons dit déjà, ce qu'on nomme le *rendement* ; nous pouvons maintenant le connaître sans difficulté, au moins au point de vue électrique, réserve indispensable à faire, car nous ne tenons pas compte des résistances passives, pertes par transmissions, etc., (les travaux réels mesurés mécaniquement seront nécessairement affectés d'une perte plus grande). En effet le travail engendré est EI, le travail récupéré est eI, le rendement sera donc $\frac{eI}{EI}$, ou en supprimant I qui disparaît, étant commun aux deux termes de la fraction, quand le circuit ne présente pas de pertes notables, le rendement est fourni par le rapport $\frac{e}{E}$. On voit immédiatement que les résistances n'entrent pas dans cette formule ; or comme ces résistances représentent la distance du transport, on est amené à conclure que le rendement ne dépend pas de la distance. On doit observer que si on fixe la valeur du travail récupéré ainsi que la perte que l'on entend subir, c'est-à-dire le rendement, ces chiffres peuvent être, comme nous venons de le dire, choisis sans tenir compte de la distance ; mais ils

ne pourront être obtenus que si les forces électromotrices remplissent certaines conditions précises et s'élèvent à des valeurs déterminées.

Ces lois étaient aperçues, mais assez obscurément, dans les années qui ont précédé l'Exposition ; et nous avons dit qu'on avait déjà manifesté une certaine tendance à employer, pour le transport de la force, de l'électricité à tensions élevées ; toutefois cette marche était plutôt instinctive que raisonnée. On connaissait certaines formules, sans en voir la liaison et sans en connaître l'importance. C'est à M. Marcel Deprez qu'on doit la théorie d'ensemble qui vient d'être esquissée ; il montra le premier, dans le cours de l'année 1880-81, qu'il était possible d'obtenir à toute distance un travail déterminé avec un rendement fixé d'avance, à la condition de donner aux forces électromotrices des machines des valeurs déterminées.

Il fit plus, il donna le moyen d'obtenir ces forces électromotrices d'une façon certaine.

Jusque-là, en effet, on avait traité les machines dynamo-électriques d'une façon à peu près empirique ; certaines lois qui régissent leur fonctionnement étaient bien connues, elles n'étaient autres que les lois de l'induction électrique formulées par Ampère et Faraday, mais certains points restaient dans une obscurité qui n'est même pas encore dissipée. Parmi ces côtés mal connus, il faut mettre en tête l'aimantation du fer par les courants électriques. Les machines, nous l'avons dit, produisent l'électricité en faisant passer rapidement des fils devant le pôle d'un électro-aimant ; celui-ci fait partie de la machine même, sa variation dépend donc de celle de la machine, et malheureusement les lois de cette variation sont inconnues ; toutes les fois qu'on modifiait une machine ou qu'on en créait une nouvelle, il restait donc forcément un élément ignoré introduisant une part d'aléa dans le résultat. Par une conception très heureuse, M. Marcel Deprez montra qu'il y avait moyen de faire varier les machines sans modifier ce champ

magnétique mystérieux, et qu'on pouvait se mouvoir dans le champ des lois connues sans avoir à tenir compte de l'élément rebelle, celui-ci restant invariable. Dès lors il devint possible de déterminer à l'avance les résultats d'une machine, de la construire à coup sûr, et M. Marcel Deprez montra le procédé à suivre.

Il entra dans la voie qu'il avait ainsi tracée, et après des études de laboratoire très complètes où les principes qu'il avait énoncés furent successivement et minutieusement vérifiés, il réalisa la remarquable expérience dont nous parlons, et qui fut le premier exemple de transport électrique de la force à grande distance dans des conditions pratiques.

Cette expérience marque sans aucun doute un pas très important; aux yeux des hommes de science et de bonne foi elle montrait la question résolue; pour le public, il pouvait rester une réserve : l'expérience faite avec des machines des anciens types, destinée d'ailleurs à rester une démonstration, ne portait que sur des forces de médiocre importance; le travail transmis de Miesbach et recueilli à Munich était d'environ un demi-cheval-vapeur. Il fallait entrer dans la région industrielle et aborder les grandes forces; de ce côté on doit encore à M. Marcel Deprez la démonstration de ce fait que les grandes machines électriques sont de beaucoup plus avantageuses et plus économiques que les petites; démonstration qui fut théorique d'abord et qui devint pratique, M. Deprez ayant construit une machine capable d'absorber un travail de 70 chevaux. Cette machine donne de l'électricité à une tension qui dépasse 4000 volts. Maintenant, la voie est grandement ouverte, le transport de la force est pleinement entré dans la période pratique et industrielle, quel sera l'avenir?... il n'est permis à personne de le préciser, mais on peut en voir les grandes lignes avec une suffisante certitude. Nous l'avons dit déjà, il n'est pas douteux que ce mode de transport de l'énergie va s'appliquer d'abord à

l'utilisation des forces jusqu'ici inutilisées à cause de leur situation, et en tête marcheront les chutes d'eau. Il se peut qu'au premier abord on ne soit pas frappé de l'importance de ces forces, mais si le lecteur veut y penser un instant, il n'en est aucun qui ne découvre autour de lui quelque source de force restée sans emploi. Les fleuves et les rivières ont presque tous des chutes qui pourront être utilisées ; par exemple les barrages de la Seine aux environs de Paris pourraient donner environ 2000 chevaux-vapeur chacun, et il y en a trois dans un rayon de 10 kilomètres. Autre exemple : on a calculé que la Marne fournirait par ses chutes assez de force pour mettre en mouvement le chemin de fer de l'Est dans toute la partie où il la longe; et les chutes du Rhône, et les innombrables chutes d'eau en montagne; il n'est pas besoin d'aller, comme on l'a souvent donné en exemple, jusqu'aux chutes gigantesques du Niagara, la somme des forces médiocres répandues autour de nous suffira à procurer un accroissement énorme de la puissance humaine.

Ce n'est là d'ailleurs qu'une des applications du transport de la force, c'est la plus frappante parce qu'elle est toute prête et sera la première réalisée, mais on en aperçoit d'autres; on pourrait utiliser la force énorme des marées; la puissance irrégulière mais cependant considérable du vent pourrait être accumulée et transportée, et ainsi de beaucoup d'autres. Au point de vue général, c'est un précieux avantage que d'avoir pu donner à la force une sorte de privilège d'ubiquité, on en multiplie ainsi les utilités dans une immense proportion; surtout si l'on peut y joindre la faculté de division dont nous allons parler.

IX. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

En quoi consiste le problème. — Les solutions approximatives. — La régulation à la main. — Système Edison. — Les régulateurs mécaniques de Maxim et autres. — La solution Marcel Deprez. — Utilité et avenir de la distribution.

On a vu par les chapitres précédents combien il est utile de pouvoir transporter une force, combien cette faculté a déjà trouvé et trouvera d'applications. Elle est surtout féconde en promesses parce qu'elle permettra d'amener au point de travail et d'y utiliser des forces très considérables, telles que celles des grandes chutes d'eau aujourd'hui perdues. Mais, amené à ce point, le problème n'est pas complètement résolu. Supposons, en effet, et le cas se présentera avant peu d'années, qu'on ait capté et transporté une puissance de 1000 chevaux-vapeur, il faudra en tirer parti; il est peu d'établissements qui aient besoin d'un pareil travail moteur; il faudra donc la répartir entre plusieurs usines : cela peut, jusqu'à un certain point, se faire par des moyens mécaniques, mais dans des limites de distance très restreintes, non sans beaucoup de dépense et de perte de force. La vraie solution consiste évidemment à diviser l'électricité elle-même et à ne la transformer en énergie mécanique qu'après l'avoir répartie entre les intéressés. La répartition pourra ainsi s'opérer bien plus aisément, l'électricité se laissant diviser et canaliser avec de simples fils conducteurs. On imagine alors une division bien plus grande, presque illimitée; non seulement on répartira une grande force entre plusieurs usines, mais dans chacune d'elles on fractionnera électriquement le pouvoir moteur pour desservir chacune des machines-outils; on fera mieux, on subdivisera le courant total en courants particuliers de nombre

illimité dont chacun ira, dans des maisons différentes, porter à domicile, à des consommateurs, les utilités si nombreuses que l'électricité renferme.

Tout cela est possible, sans doute, mais à la condition que ce fractionnement d'un courant total sera opéré d'une façon régulière et déterminée. Il faut, en effet, que chacun des outils alimentés, chacun des consommateurs desservis, ait sa part limitée, qu'il la reçoive, sans pour cela influencer les autres; il faut, en un mot, faire pour l'électricité ce qu'on fait pour l'eau, une distribution.

Le problème n'est pas sans difficultés, car s'il est facile de diviser l'électricité rien qu'en lui présentant des voies ouvertes, il l'est beaucoup moins de la diviser d'une façon définie, comme on va s'en rendre compte.

Rappelons la loi fondamentale de Ohm, elle est la clef de la question; nous savons que si l'on appelle I l'intensité d'un courant, E la force électromotrice du générateur, et R la résistance du circuit, il existe entre ces trois quantités une relation exprimée par la formule suivante $I = \frac{E}{R}$. Imaginons donc que nous disposions d'une source d'électricité dont la force électromotrice soit E et qu'il s'agisse d'en distribuer le courant également entre plusieurs appareils (ce sera ce que l'on voudra, des lampes, des bacs à galvanoplastie, des machines, etc.) que, pour simplifier, nous supposerons tous semblables. Nous installons sur notre générateur un premier appareil, il s'établit alors un certain régime; un courant d'intensité I, résultant de la force électromotrice E et de la résistance R, prend son cours; l'installation jusqu'ici est convenable; il faut maintenant placer un deuxième appareil : comment s'y prendre? Nous commencerons par le mettre à la suite du premier dans le même circuit; mais alors, sa résistance s'ajoute à celle qui existait déjà, l'intensité ne pourra donc rester la même, elle diminuera; en conséquence, si l'installation était convenable tout à l'heure,

elle cessera de l'être maintenant, le premier appareil comme le second étant alimentés d'une façon insuffisante : pour rétablir l'état de choses précédent et ramener l'intensité du courant à la valeur qu'elle avait, il faudra nécessairement, à mesure que nous introduirons dans le circuit un appareil augmentant la résistance, augmenter dans une proportion correspondante la force électromotrice du générateur, c'est-à-dire exercer sur lui une régulation convenable.

Avant de recourir à ce moyen, essayons d'un autre procédé. Tout à l'heure, ayant un appareil installé, pour en placer un autre nous nous sommes contentés de l'insérer dans le circuit déjà existant; au lieu d'opérer de cette façon, nous pourrions créer pour le second appareil un deuxième circuit semblable au premier et offrir ainsi au courant autant de voies nouvelles qu'il y aurait d'appareils à desservir. Voyons ce qui en résulterait : un premier appareil est placé, le courant a une intensité $I = \frac{E}{R}$ et tout marche bien ainsi; nous introduisons un deuxième appareil avec un deuxième circuit, le courant trouve ainsi deux routes semblables au lieu d'une, la résistance qu'il éprouve est donc moitié moins grande, R est diminué de moitié, il devient égal à $\frac{R}{2}$; il s'ensuit que l'intensité I deviendra double; ainsi doublée, cette intensité I se partagera entre les deux chemins semblables qui lui sont offerts, le premier appareil conservera l'intensité I qui l'alimentait, tandis que le nouveau trouvera une autre intensité semblable pour le desservir. Il semble donc que la solution du problème soit trouvée. Par malheur tout le raisonnement que nous venons de faire est inexact, nous avons négligé un élément nécessaire. Nous avons admis comme point de départ qu'en offrant au courant deux circuits au lieu d'un, la résistance qu'il avait à vaincre diminuait de moitié, cela est faux : en effet, la résistance

que doit traverser le courant ne se compose pas seulement du circuit où sont les appareils, elle comprend aussi la résistance propre du générateur électrique; que celui-ci soit une machine, une pile, ou tout ce qu'on voudra supposer, le courant doit toujours la parcourir, et il y rencontre toujours une résistance; il suit de là qu'en dédoublant le circuit extérieur offert au courant, nous avons bien diminué de moitié la résistance extérieure, mais nous n'avons pas touché à la résistance du générateur, que l'on nomme aussi résistance intérieure : la résistance totale a donc été diminuée, mais non de moitié; c'est pourquoi si l'intensité a été augmentée elle n'a pas été doublée comme nous le supposions tout à l'heure, et notre installation est encore défectueuse; elle ne pourrait être exacte qu'en annulant la résistance du générateur, ce qui est impossible; à défaut de ce moyen, il faudra faire varier la force électromotrice du générateur, c'est-à-dire opérer une régulation.

De quelque façon que l'on opère, on est donc conduit forcément à régler le générateur électrique suivant la demande d'énergie qui lui sera faite par l'introduction successive d'appareils dans son circuit.

Si l'on examine la question d'un peu plus près, on verra que pour être satisfaisante, il convient que cette régulation satisfasse à trois conditions :

1° Il faut que les appareils divers placés sur la distribution soient tous alimentés indépendamment les uns des autres, c'est-à-dire que chacun d'eux reçoive la part d'électricité qui lui est nécessaire, en quelque moment et en quelque lieu que ce soit, sans que les autres, placés sur le même circuit, en soient influencés.

2° Il faut que la machine génératrice fournisse ainsi à chaque instant toute l'énergie demandée, mais pas davantage, autrement il y aurait perte.

3° Les mouvements électriques étant très rapides, il est fort important que la régulation nécessaire pour remplir

les conditions précédentes soit opérée automatiquement.

Telles sont les conditions extérieures indispensables à toute distribution, pour qu'elle soit complète.

Avant d'énumérer les efforts faits dans le sens de la distribution, nous étudierons rapidement les conditions théoriques auxquelles on doit satisfaire.

Ainsi que nous l'avons dit en commençant, il y a deux façons de faire alimenter plusieurs appareils électriques par une même source. La première consiste à les mettre l'un à la suite de l'autre enfilés sur un seul circuit; on appelle cela les disposer en série; la seconde consiste à donner à chacun d'eux un circuit spécial, ou au moins un branchement particulier issu du circuit principal; on nomme cet arrangement disposer les appareils en dérivation.

Nous savons que dans les deux cas, si l'on veut que tous les appareils soient bien alimentés et que l'adjonction de l'un d'eux ne trouble pas le fonctionnement des autres, il faut régler à chaque instant la force électromotrice du générateur en raison du nombre des appareils à desservir; toutefois ce réglage ne doit pas se faire de la même façon suivant qu'on adopte l'arrangement en série ou l'arrangement en dérivation; une comparaison permettra d'élucider ce point.

Supposons qu'il s'agisse d'utiliser une chute d'eau. Imaginons d'abord que ce soit un torrent des Alpes, laissant tomber d'une grande hauteur un petit volume de liquide: on pourrait dans ce cas disposer l'une au-dessus de l'autre dans la hauteur un certain nombre de roues hydrauliques, la seconde recevant l'eau qui aura fait tourner la première, la troisième l'eau de la seconde et ainsi de suite jusqu'en bas; chaque roue reçoit tout le volume d'eau débité, mais n'utilise qu'une partie de la hauteur de chute. Dans une disposition de ce genre, si l'on devait ajouter une roue au système, il faudrait la mettre au-dessus des autres, et par conséquent, si la chute d'eau

doit être modifiée, il faudra lui donner un surcroît de hauteur sans qu'il soit nécessaire de modifier son débit.

S'il s'agit au contraire d'un courant d'eau large mais présentant une chute médiocre comme hauteur, on pourra en dériver un certain nombre de canaux de largeur convenable et installer sur chacun d'eux une roue hydraulique : alors chacune de ces roues utilisera toute la hauteur de chute et seulement une portion du débit. S'il s'agit d'en ajouter une de plus, on sera conduit à ajouter un canal dérivé afin de pouvoir mettre une roue nouvelle à côté des autres et à lui fournir l'eau nécessaire à son fonctionnement; on n'aura pas changé la hauteur de chute, on n'aura modifié que le débit.

Les deux dispositions que nous avons indiquées pour les appareils électriques offrent une certaine analogie avec les arrangements précédents; si l'on place les appareils à la suite l'un de l'autre, en série, ils seront comme les roues hydrauliques mises en hauteur; pour en introduire un nouveau il n'y aura pas à changer le débit électrique, il suffira de modifier la tension qui correspond à la hauteur de chute de l'eau; aussi quelquefois au lieu de dire que ces appareils sont en série, l'on dit qu'ils sont en tension. Si l'on place les appareils à côté l'un de l'autre pour en augmenter le nombre, on laissera la tension constante, et on augmentera le débit; dans ce cas, au lieu de dire que ces appareils sont en dérivation, on peut dire également qu'ils sont en quantité. (Voir notre premier chapitre page 26.)

Nous sommes donc conduits à deux modes de régulation qui devront être appliqués suivant les cas. Nous n'insisterons pas sur la régulation en série; elle a plusieurs inconvénients graves, d'abord les appareils dépendent les uns des autres au point de vue de la sécurité; c'est-à-dire que si l'un d'eux éprouve un accident, tous les autres seront arrêtés; de plus la régulation suppose de très grandes variations de force motrice, et conduit très rapi-

dement à des tensions excessivement élevées. Il n'est pas théoriquement impossible d'employer ce système, pratiquement, il est douteux qu'il soit jamais applicable. La régulation en dérivation est celle qui donnera la solution, cela paraît certain; c'est la seule qui ait été mise en usage dans les expériences faites jusqu'ici.

On voit à quoi se réduit le problème; maintenir constante la hauteur de chute électrique, la tension, quel que soit le nombre des appareils et des dérivations sur lesquels ils sont placés. Il faut remarquer que cette tension qui doit être maintenue constante est celle qui se constate aux points de sortie de la machine génératrice; c'est en effet de ces points que partent les circuits et les dérivations diverses sur lesquelles sont placés les appareils; c'est la tension en ces points qui règle le débit extérieur: ce qu'il faut donc c'est de faire varier la force électromotrice de la machine de façon que la tension (en termes scientifiques la différence du potentiel), aux bornes de sortie, soit constante à chaque instant, quel que soit le circuit extérieur et quelques variations qu'il subisse.

D'où l'on voit qu'il peut y avoir deux méthodes, l'une consistant à surveiller les variations qui tendraient à se produire et à les corriger aussitôt, l'autre à placer l'appareil générateur dans des conditions telles que les variations ne puissent pas se produire. Dans la première méthode la surveillance et la correction peuvent être opérées soit à la main, soit automatiquement; mais il faut remarquer immédiatement que si elles sont opérées à la main, nous ne sommes plus dans les conditions que nous avons reconnues nécessaires, l'intervention d'un agent non mécanique étant une cause d'insécurité et de lenteurs, qui doit être écartée.

La solution de cette question était tellement urgente dans ces dernières années, elle s'imposait d'une façon si pressante, si impérieuse, qu'il s'est produit un nombre assez notable de solutions pratiques qui, bien qu'approxi-

matives et incomplètes, ont eu le mérite d'avoir aidé à résoudre tant bien que mal le problème dans les cas où il fallait absolument le faire.

Nous allons énumérer quelques-unes de ces diverses solutions. Les travaux qui les ont fait naître ont été accumulés dans un espace de temps si court qu'il serait assez difficile de donner avec exactitude l'ordre chronologique et l'indication certaine des priorités. La question légale, reposant sur des dates constatées, serait assez facilement éclaircie, mais, en ce qui concerne la première invention selon la science, beaucoup de réclamations se sont produites, et il est devenu très difficile de décider. D'ailleurs, les recherches scientifiques ont aujourd'hui changé de forme et se sont, pour ainsi dire, démocratisées. Autrefois les inventeurs formaient une sorte d'aristocratie peu nombreuse; maintenant, les résultats semblent sortir d'un ensemble de petits travaux individuels, ce qui ne les rend ni moins brillants, ni moins utiles, mais en obscurcit beaucoup l'origine.

Nous suivrons donc, au lieu de l'ordre chronologique, une sorte d'ordre logique permettant de voir le développement successif des moyens employés.

A cet effet, nous citerons d'abord les solutions qui ont essayé de suivre la première méthode, c'est-à-dire d'éliminer les variations de tension aux bornes de la machine à l'aide d'un appareil de surveillance et de correction; nous placerons ensuite celles qui, selon la seconde méthode, ont tendu à empêcher complètement ces variations de naître.

Voici les premières :

Un premier moyen est celui qu'emploie M. Edison. Il cherche à agir sur le générateur en modifiant la production même du courant. Nous savons qu'il existe trois moyens de faire varier les courants produits par une machine : le premier consiste à modifier sa vitesse; c'est là un procédé fort incommode mécaniquement, et peu

pratique : les deux autres moyens agissent sur le système magnétique, c'est-à-dire modifient l'action que les électro-aimants exercent sur la bobine tournante; cela peut se faire premièrement en écartant les aimants de cette bobine, et il est visible que ce procédé n'est pas commode; cela peut se faire aussi en faisant varier le courant qui anime ces électro-aimants et produit le champ magnétique; c'est là évidemment le procédé le plus commode, c'est celui que tout le monde a adopté et c'est celui qu'Edison est parvenu jusqu'à un certain point à appliquer.

Cela suppose une première condition : c'est que les électro-aimants ne soient pas mis en action uniquement par le courant utile de la machine; en effet, il serait impossible alors de faire varier l'excitation sans modifier dans le même sens le courant extérieur. Dans le système Edison, les aimants sont excités par une dérivation prise sur le circuit général. C'est sur ce circuit accessoire qu'est placée une boîte à cadran qui renferme des résistances variables. Sur cette boîte se trouve une manivelle, et à côté un surveillant qui, averti par un appareil indicateur, par exemple celui qu'on nomme un électro-dynamomètre, manœuvre la manivelle de façon à maintenir le courant dans de bonnes conditions.

La présence obligée de ce surveillant montre en quoi ce système ne satisfait pas aux conditions nécessaires ; il n'est pas automatique et pour un service étendu, satisfaisant à des besoins variés et imprévus, ce genre de surveillance serait insuffisant. Il paraît que M. Edison a appliqué son système à une grande installation d'éclairage qu'il a récemment inaugurée à New-York, nous n'avons pas encore de renseignements définitifs sur le succès de cette entreprise, mais il est à remarquer en tout cas que ce genre de distribution qni est des plus simples ne comprend que des appareils tous semblables et n'a à satisfaire que des besoins qui, dans une grande proportion, peuvent être prévus d'avance.

On voyait aussi à l'Exposition d'électricité le régulateur de M. Maxim dont nous donnons la représentation figure 109. Il y a là un régulateur mécanique. Il a pour pièce essentielle un levier que la machine anime conti-

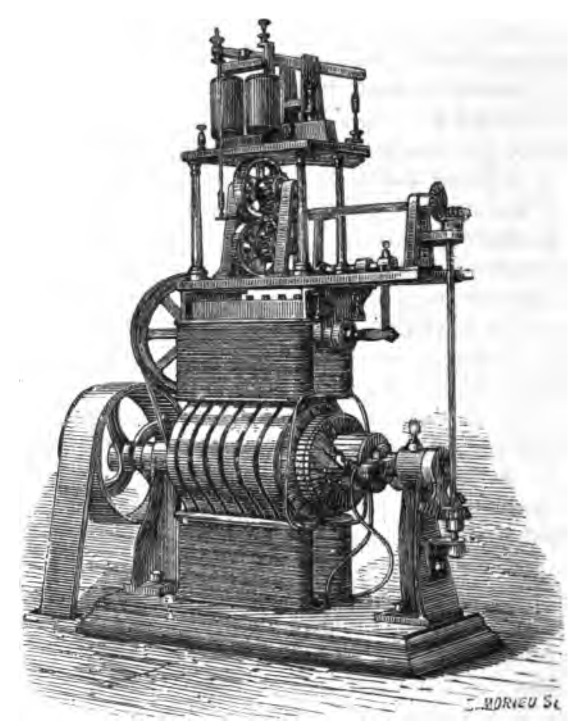


Fig. 109. — Régulateur de courant de M. Maxim.

nuellement d'un mouvement alternatif d'arrière en avant. Ce levier, qui porte deux petites cames saillantes, est suspendu entre deux roues dentées; s'il monte il touchera celle de dessus, et par l'intermédiaire de sa came la fera tourner d'une dent à chacune de ses oscillations; s'il des-

cend, ce sera la roue de dessous qui sera mise en mouvement. Or, ce levier est relié à l'armature d'un électro-aimant dans lequel passe le courant à régler; il s'ensuit que si le courant est trop fort, l'armature sera attirée et s'abaissera, entraînant le levier qui mettra en mouvement la roue inférieure; si le courant est trop faible, l'armature tirée par un ressort se relèvera et le levier, relevé avec elle, mettra en mouvement la roue supérieure; pour un courant normal il n'y aura pas de mouvement. Les roues dentées ainsi mises en jeu ne sont pas employées à introduire des résistances dans un circuit comme le fait M. Edison, elles agissent sur les frotteurs de la machine et les déplacent. On sait que dans les machines dynamo-électriques le courant est recueilli par deux ressorts ou balais qui frottent sur un collecteur cylindrique tournant. Suivant la position de ces balais, on peut recueillir le courant, soit au point maximum, soit à un autre où il y en a moins; on peut donc faire varier le courant en déplaçant les balais.

Au point de vue du fonctionnement de la machine, ce procédé est très défectueux, et on le conçoit aisément. D'après ce que nous avons dit des machines dynamo-électriques, on a compris que la position des frotteurs était déterminée : or si ces frotteurs doivent pouvoir être déplacés dans un sens et dans l'autre, il s'ensuit que leur position moyenne, celle qu'ils occupent d'ordinaire, n'est pas leur position la plus avantageuse; c'est-à-dire que lorsque le système sera dans son état normal, en bonne marche, les frotteurs de la machine ne seront pas à leur position régulière; on voit immédiatement combien cet inconvénient est sérieux.

Ce système a d'ailleurs ce défaut grave que le régulateur est très lent; théoriquement il doit agir; pratiquement, il n'a pas fonctionné à l'Exposition, et il est fort douteux qu'il ait jamais réellement servi. Pour une distribution importante il serait complètement insuffisant.

Le régulateur Lane Fox avait quelque analogie avec le précédent, comme lui il reposait sur l'emploi d'un électro-aimant, mais au lieu d'agir sur les balais, comme dans le système Maxim, il servait, comme dans le procédé Edison, à introduire des résistances artificielles dans le circuit spécial qui animait les électro-aimants ou à les retirer. Ces modifications du circuit étaient opérées par une série d'attractions de la palette d'un aimant, c'est-à-dire avec une grande lenteur; ce régulateur n'a pas fonctionné et tout donne lieu de penser qu'il est incapable d'agir sérieusement en raison de sa paresse.

Le système d'éclairage Brush fut très remarqué à l'Exposition, et à certains égards il méritait cette distinction. Sans être réellement plus parfait que les autres, au point de vue de la lampe et du résultat obtenu, ainsi que l'ont du reste démontré les expériences subséquentes, il partagera avec le système à bougies de M. Jamin l'honneur d'avoir inauguré l'emploi des hautes tensions dans les applications de l'électricité. Nous avons dit plus haut que M. Gramme avait fait des machines atteignant des tensions de 300 volts, celles de M. Brush ont atteint 1000 et même dans certains cas 2000 volts; nous avons dit que M. Marcel Deprez, dans ses expériences de transport, avait atteint et dépassé ces tensions. Il est intéressant de noter ce fait qu'un inventeur, sans être appuyé sur les notions théoriques solides qui avaient guidé M. Jamin et conduit M. Deprez, avait assez bien compris la nécessité des hautes tensions pour s'y aventurer avec hardiesse.

Nos lecteurs excuseront cette digression, ce n'est pas là en effet le point que nous devons signaler dans le système Brush, ce système comprenant un dispositif de régulation. Disons immédiatement qu'il était très élémentaire. Pour faire varier le courant d'aimantation on y disposait un circuit dérivé, que l'on ouvrait plus ou moins suivant l'énergie à obtenir. On voit aisément que

ce procédé revient à perdre ce que l'on a de trop, sans cesser pour cela de le produire; il ne répond donc pas à la deuxième condition énoncée ci-dessus, puisque la machine génératrice ne cesse de fournir de l'énergie bien qu'on n'en ait pas besoin et qu'on la rejette comme superflue. Le système avait d'ailleurs une disposition à main et une automatique, toutes deux très critiquables à divers points de vue. De même que ceux qui ont été déjà cités il n'a pas fonctionné, et il est certain d'avance qu'il n'est pas capable de fonctionner sérieusement.

Des études théoriques intéressantes avaient d'ailleurs été faites sur ces questions dans le temps même où se produisaient les essais que nous venons de décrire : on doit à M. E. Hospitalier un projet de système complet, satisfaisant aux conditions à remplir à l'aide de moyens régulateurs mécaniques dont l'ensemble paraît assez satisfaisant. On doit également à M. G. Cabanellas un projet de distribution particulier ; au lieu de placer les appareils en dérivation comme l'ont fait tous les précédents, il les place en série, c'est-à-dire tous sur un même circuit : ce procédé a, comme nous l'avons déjà dit, le défaut d'entraîner nécessairement l'emploi de tensions excessivement élevées, ce qui permet d'affirmer qu'il ne peut être appliqué réellement; toutefois certains des organes qu'il comprend pourront être de quelque utilité dans certains cas ; nous ne pouvons du reste insister sur un système à l'état de projet.

Nous arrivons aux solutions qui tendent à éviter complètement les variations de tension aux bornes de la machine.

L'un des procédés les plus élémentaires que l'on puisse citer est celui qui est dû à M. Gravier. Il réduit le problème à ses termes les plus simples.

Nous avons dit que la difficulté tenait à ce que les machines génératrices avaient une résistance intérieure et que le problème disparaissait si l'on parvenait à

supprimer cette résistance. Ne pouvant le faire, M. Gravier s'est efforcé de la réduire. Pour cela il a pris un certain nombre de machines qu'il a associées en quantité, ou, comme on le dit aussi, en surface, de manière que leur ensemble offrît au courant le moins de résistance possible. Afin de la réduire encore, il a pris soin de faire exciter ces appareils par une autre machine. Cela fait, il place sur ces générateurs des circuits qu'il fait autant que possible égaux, et dans lesquels il emploie des fils conducteurs aussi gros que possible. Il arrive alors que si on supprime un circuit, les autres étant égaux continuent à être desservis également; et la résistance intérieure étant d'ailleurs très faible, la production électrique reste approximativement proportionnelle à la résistance extérieure. M. Gravier avait fait à l'Exposition d'électricité en 1881 une installation de ce système; il alimentait ainsi des lampes, des outils placés sur six circuits distincts; son dispositif générateur comprenait cinq machines accouplées.

Ceci n'est pas une solution, c'est un procédé qui peut être utile, une bonne mise en œuvre d'un principe de physique connu; mais on voit bien que la difficulté n'est pas surmontée, elle est amoindrie, dissimulée, mais elle existe et n'est pas vaincue; aussi ce procédé n'est-il applicable que dans de petites proportions. Il a d'ailleurs un vice capital : c'est que les machines à petite résistance intérieure sont toujours des générateurs électriques à petite tension; ils ne peuvent donc se prêter au transport de l'électricité, comme nous le savons. Or, pour distribuer utilement, il faut transporter; le système que nous décrivons est donc d'avance borné à des limites excessivement étroites : c'est simplement une façon de s'arranger le mieux possible, ce n'est pas une solution.

Nous arrivons à la solution proposée par M. Marcel Deprez, qui est certainement de beaucoup la plus importante de celles que nous avons à énumérer. Elle a pour

elle cet avantage sérieux qu'elle a été expérimentée. L'application en a été faite au palais de l'Industrie pendant l'Exposition d'électricité de 1881. Un circuit partant des générateurs faisait presque le tour de l'édifice, présentant un parcours total de deux kilomètres environ : en divers points, choisis sans distinction et en tenant compte seulement des besoins, on avait installé des dérivations, et chacune d'elles animait des machines-outils diverses : machines à coudre, à plisser, scier ou découper, petits tours à métaux, etc. En l'un des points on avait réuni les appareils pour former un petit atelier dans lequel on utilisait aussi une dérivation du courant à faire de la lumière. Vers l'extrémité du circuit on avait installé une grande presse d'imprimerie qu'un petit moteur électrique également branché sur le circuit général mettait en mouvement.

Tous ces appareils étaient mis en action ou arrêtés à volonté et d'une façon tout à fait indépendante : il y avait donc là un véritable exemple de distribution.

Il reste à voir comment était opérée la régulation nécessaire. En allant au point de départ, on trouvait seulement deux machines génératrices, une grande et une petite, tournant ensemble et présentant l'aspect indiqué par la figure 110 ; c'était là tout. En effet, le système de M. Marcel Deprez, et c'est là son très grand avantage, ne fait usage d'aucun organe mécanique, il opère par le seul jeu des forces physiques.

En examinant le fonctionnement des machines, l'inventeur a reconnu que l'on pouvait arriver au résultat en combinant sur les électro-aimants d'une machine deux excitations simultanées. A cet effet, sur les électro-aimants de la grande machine, M. Marcel Deprez enroule deux fils distincts : l'un est parcouru par le courant venant de la petite machine, il donne ainsi à la génératrice une excitation constante et qui ne dépend en rien du circuit extérieur ; reste le deuxième circuit, celui-là

est parcouru par le courant qui va ensuite se rendre dans le circuit extérieur, il ajoute donc à l'aimantation constante unc aimantation variable avec la dépense du circuit. M. Marcel Deprez a reconnu qu'en se plaçant dans des conditions convenables cette aimantation variable pouvait être justement suffisante pour donner l'accroissement de force électromotrice nécessaire à mesure

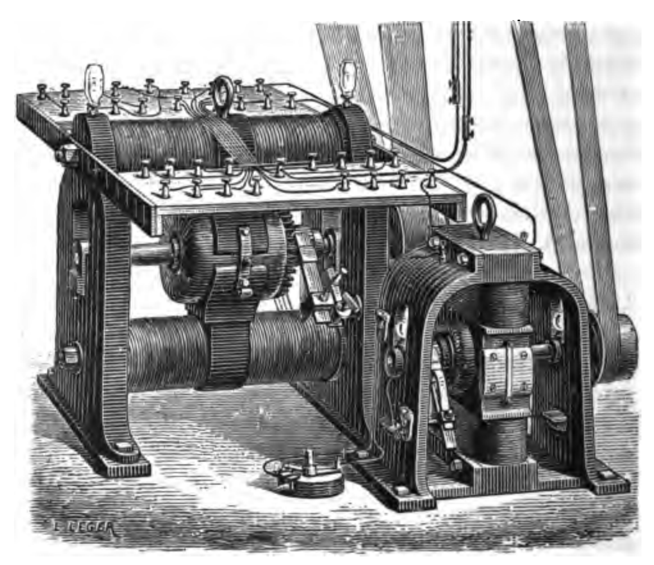


Fig. 110. — Distribution de l'électricité, système Deprez.

que la dépense d'énergic s'accroîtrait. Il a ainsi obtenu une régulation automatique opérée sans organes matériels et satisfaisant de la façon la plus complète aux conditions posées ci-dessus.

L'expérience du palais de l'Industrie a été faite dans de petites proportions; la prudence exige donc qu'avant de se prononcer complètement on attende une réalisation plus étendue et plus pratique; toutefois on doit reconnaîtrc

que nous rencontrons ici les plus grandes garanties de succès : une étude théorique claire et convaincante appuyée d'une expérience prolongée, on ne peut rien demander de plus rassurant. Si l'on se demande comment, après un si beau commencement, on n'a pas repris cette question depuis l'Exposition, on s'apercevra bientôt qu'une question préliminaire devait être résolue : pour distribuer des forces sérieuses, il fallait avoir de grandes machines, et pour les distribuer efficacement il fallait pouvoir les transporter au loin, c'est-à-dire que la question de la distribution ne peut être abordée qu'après une solution complète et industriellement pratique de la question du transport de la force. Nous avons dit à quel point on en était et comment la solution pouvait de ce côté être considérée comme atteinte ; il est probable que nous allons voir prochainement aborder franchement celle de la distribution de l'énergie par l'électricité.

Ce sera là certainement un des grands événements qu'aura vus notre siècle, et ce fait constituera une véritable évolution sociale.

Ce progrès se résume en effet dans ce mot : porter l'électricité à domicile, c'est dire à la fois la lumière, le travail chimique et la force ; tout cela par fractions aussi petites qu'on le voudra, mis à la disposition du consommateur par le simple jeu d'une clef. En tout lieu, cela procurerait des avantages incalculables, mais il est permis de penser qu'aucun pays ne tirera plus de profit que le nôtre de cette faculté. Les Français ont en général un esprit d'invention remarquable, une ingéniosité toujours en éveil, et si peut-être l'audace des grandes entreprises leur manque un peu, l'initiative prudente ne leur manque pas ; on peut tout attendre de ces dispositions heureuses lorsque chacun d'eux tiendra dans sa main l'énergie sous ses formes les plus variées, et cela chez lui, à son heure et sans avoir besoin d'aller la chercher dans la discipline étouffante de l'atelier.

L'atelier! ce mot ouvre d'autres points de vue, car si la distribution d'électricité a des avantages immenses pour les hommes, elle en a de bien plus grands encore pour les femmes; c'est pour elles que l'atelier est au plus haut point funeste, on sait quels sont les dangers de cette vie en commun, si profondément destructive de la santé et des bonnes mœurs. Nous avons déjà signalé ce fait : que les premières applications pratiques du transport de la force ont servi à mettre en action des ateliers de machines à coudre, épargnant ainsi aux femmes un travail nuisible; combien plus grand sera le progrès, lorsque la femme pourra faire mouvoir ainsi la machine, non plus à l'atelier, mais chez elle, au foyer de l'époux, près du berceau de l'enfant! C'est là que se trouve véritablement l'égalité des deux sexes, c'est là qu'il faut chercher la solution de cette difficile et brûlante question : la subsistance et l'indépendance des femmes. La distribution apportera un puissant secours dans ces difficultés sociales, et cette distribution, si nous ne la possédons pas absolument, nous pouvons au moins considérer comme certain que nous y touchons.

NOTES

Note A. — **Considérations sur l'avenir des électromoteurs par M. Jacobi. — Extrait du Mémoire présenté par lui à l'Académie des sciences de Paris en décembre 1834.**

Dans l'historique que nous avons fait, pages 42 et 48, des recherches de M. Jacobi sur son électromoteur, nous n'avons pas rapporté la partie théorique de son mémoire, car elle aurait paru trop scientifique aux lecteurs auxquels s'adresse notre volume. Toutefois, comme en présence des progrès accomplis dans ces derniers temps dans les électromoteurs cette question a pris un certain intérêt, nous croyons devoir la reproduire en note afin que ceux qui ne sont pas effrayés par les formules puissent voir que le savant russe avait fait dès l'origine une étude très sérieuse de la question, et que ses espérances n'étaient pas aussi vaines qu'on aurait pu le croire il y a quelque temps, et qu'il le crut lui-même peu de temps après ses derniers essais.

A l'époque où M. Jacobi présenta son mémoire à l'Académie des sciences de Paris, cette Académie ne publiait pas le compte rendu de ses séances, car ce n'est qu'en 1835, sur la proposition de M. Arago, que fut fondée la belle publication qui, sous le titre de *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, est aujourd'hui si appréciée et si répandue dans le monde entier. Le mémoire de M. Jacobi ne pouvait donc pas être publié par l'Académie, mais il existait un journal fondé par M. Arnoult sous le titre de *l'Institut*, qui en tenait lieu, et le résumé du mémoire de M. Jacobi s'y trouve publié dans le

n° 82 (du 3 décembre 1834). C'est à ce numéro que nous avons emprunté la description que nous avons donnée page 42. Voici maintenant les conclusions qui terminent ce résumé :

« 1° le mécanisme de ce moteur est très simple comparé à celui des machines à vapeur; il n'y a ici ni cylindre, ni piston, ni soupapes, etc., dont la construction puisse exiger une grande exactitude et causer de grands frais, et partant point de ces frottements qui consument en pure perte plus de la moitié du travail total; ici il n'y a presque d'autre travail stérile que le frottement des axes dans les crapaudines. De plus, cette machine donne immédiatement un mouvement circulaire continu, qu'on pourra changer en d'autres mouvements avec beaucoup plus de facilité qu'on ne peut le faire quand le mouvement primitif est un mouvement rectiligne de va-et-vient. Ici encore, point de péril d'explosion.

« 2° Tous les moteurs employés jusqu'ici au mouvement des machines sont irrévocablement soumis à cette loi, savoir que leur puissance est directement proportionnelle à l'effet économique ou aux frais que coûte leur production. Ici, l'intensité de la force magnétique peut être augmentée de trois manières : par l'agrandissement de l'appareil voltaïque; par l'augmentation des fils métalliques dont on entoure les barres, enfin en augmentant les dimensions de ces barres, principalement leur épaisseur. L'agrandissement de l'appareil voltaïque a des limites au delà desquelles l'effet magnétique n'augmente qu'insensiblement. L'augmentation du fil métallique a aussi des limites, mais beaucoup moins resserrées. Enfin, quant à l'action que l'on gagne en agrandissant les dimensions du fer soumis au pouvoir magnétisant du courant électrique, il n'y a pas de limites connues. Ainsi, le nouveau moteur sort de la catégorie des forces motrices employées jusqu'ici, par la non-proportionnalité des frais et de l'effet.

« Si l'on pouvait douter encore que même son minimum de frais d'entretien ne répondît pas tout à fait au principe d'économie qui forme toujours le nerf d'un établissement mécanique ou industriel quelconque, ces doutes seront levés dès qu'on réfléchira que le magnétisme est une force, et que l'excitation électro-magnétique s'opère instantanément.

« En effet, quand on ferme le circuit voltaïque, le fil, et

par suite la barre qu'il entoure, acquièrent la force possible dans un instant sensiblement indivisible. Si quelques expériences semblent être en contradiction avec cette instantanéité, cela tient à quelque vice d'expérimentation, soit qu'un peu d'oxyde attaché au fil ait retardé le contact métallique, soit par quelque autre accident étranger au phénomène lui-même.

« De même, si deux éléments magnétiques se meuvent l'un vers l'autre, leur action réciproque est toujours une fonction de leur distance, de sorte que leur action totale peut être exprimée $\int_0^a M\,ds$. Dans cette formule intégrale, le temps ou la vitesse n'entrent pas plus que dans les formules de l'attraction universelle, elle n'est affectée en aucune manière par la vitesse avec laquelle les deux éléments magnétiques se meuvent l'un vers l'autre. Donc on peut gagner le travail $\int_0^a M\,ds$ dans un temps quelconque, sans changer rien à la nature des individus en action, et sans augmenter la source de la force. Cela posé, et le changement des pôles se faisant instantanément, on dispose d'une force tout à fait analogue à la gravité, et l'expression $\int_0^a \frac{M\,ds}{a}$, peut être comparée au nombre g connu.

« Le mouvement du système sera donc un mouvement accéléré et ne pourra devenir uniforme à moins qu'il n'entre quelque force ou quelque résistance, qui soit fonction du temps ou de la vitesse. Il en est de ce mouvement comme de celui d'un corps tombant d'une grande hauteur, qui ne devient uniforme que par la résistance de l'air. Mais on conçoit qu'un tel élément se trouvant entièrement en dehors de la force peut être réduit autant qu'on le voudra.

« Remarquons qu'il n'en est pas de même des autres moteurs. En effet, si l'on établit une intégrale de même forme $\int_0^a P\,ds$, pour le travail qu'on en peut tirer, on suppose facilement que le point de la machine où la force P est appliquée n'a d'autre mouvement que celui qui lui est imprimé par la force motrice, laquelle, à proprement parler, n'est pas une force, mais, comme la force musculaire, l'eau, le vent et la vapeur, un système de points matériels animés par des forces.

Dès que le point d'application prend un mouvement propre, il faut que sa vitesse entre dans la formule $\int_0^a P ds$, et s'y combine avec le temps qui doit s'écouler pour produire l'intensité qu'exige la conservation de cette nouvelle vitesse. De là résulte souvent un phénomène très compliqué, comme, par exemple, dans les machines à vapeur locomotives.

« Pour établir une différence précise entre les moteurs ordinaires et le nouvel agent magnétique, on peut dire qu'avec celui-ci le mouvement accéléré devient uniforme, non par l'augmentation de la résistance, mais parce que l'action de la force sur le point d'application s'affaiblit, tandis qu'avec les autres, si le mouvement peut devenir uniforme, c'est par suite d'une cause étrangère tout à fait indépendante du principe de la force. La force magnétique peut donc être comparée à la gravité en supposant que l'on ait à sa disposition une hauteur infinie; elle agit dans toutes les directions sans trouver d'obstacles fixes, tandis que la gravité en trouve dans la surface de la terre.

« Enfin pour énoncer en peu de mots l'importance technique de ce nouvel agent, on peut dire : *Dans la machine électrique, la vitesse ne coûte pas d'argent.* »

Note B. — Quelques indications sur la disposition de la pile Trouvé faisant fonctionner son bateau électrique.

Chaque élément de cette pile est formé par une lame de zinc placée entre deux charbons, et ces lames sont découpées ainsi que l'indique la figure 111. Leurs dimensions sont les suivantes :

Hauteur totale	0^m,24.
Largeur	0 ,16
Epaisseur	0 ,005 à 0^m,008.

La surface immergée est representée en noir sur le charbon et correspond à un carré de 0^m,16 de côté.

Les charbons sont cuivrés galvaniquement dans leur partie supérieure, et ce cuivrage a pour but de diminuer considérablement la résistance du circuit de la pile, de fournir de

bons contacts d'attache pour les lames polaires et de consolider le charbon, substance toujours un peu friable. Dans ces conditions, ils résistent bien aux chocs. Les zincs fortement amalgamés présentent à leur partie supérieure une encoche qui sert à les fixer à l'axe métallique recouvert d'un tube en caoutchouc sur lequel repose tout le système. Cette encoche permet de les déplacer très rapidement soit pour les amalgamer, soit pour tout autre motif. Les contacts sont établis par des pinces mobiles du système déjà appliqué par M. Trouvé à sa pile chirurgicale. Le liquide excitateur renferme beaucoup plus de bichromate de potasse que les solutions ordinaires, mais il a fallu augmenter aussi la quantité d'acide sulfurique qui a été portée au cinquième ou au quart

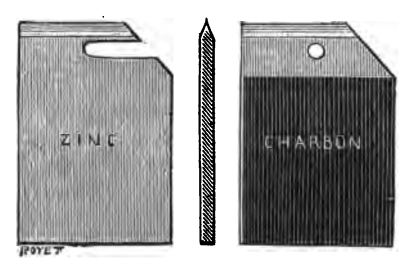


Fig. 111. — Pile Trouvé.

du poids de l'eau. Dans ces conditions, on a pu dissoudre jusqu'à 250 grammes de bichromate par litre d'eau, et les valeurs des constantes de chaque élément déterminées par M. d'Arsonval ont été :

Force électromotrice E....	1,9 volts.
Résistance de l'élément *r*..........	0,08 ohm.
Intensité au moment de l'immersion.	118 ampères.

En appliquant au moteur Trouvé à une bobine une pile de ce genre de six éléments, M. d'Arsonval a trouvé les résultats suivants :

Travail au frein..	3 kilg, 75 par seconde,
Dépense électrique	20 ampères,
Dépense du zinc par heure	144 grammes;

d'où l'on peut conclure que chaque gramme de zinc, par ce moyen, à pu donner une force de 94 kilogrammètres. Si l'on ajoute à ce chiffre 20 pour cent pour le travail absorbé par une double transmission par engrenage et chaîne Galle (le frein n'ayant pu être mis directement sur l'axe du moteur), on arrive à un travail effectif de 112 kilogrammètres par gramme de zinc. Il paraîtrait même qu'avec les moteurs à plusieurs bobines ce rendement serait encore plus éleyé.

On a prétendu, d'un autre côté, que la pile dont nous parlons ayant été appliquée à une machine Gramme, a pu lui faire produire pendant trois heures consécutives une force de 14 kilogrammètres par seconde. Voici du reste un tableau d'expériences que nous a remis M. Trouvé :

Poids du moteur		Travail mesuré au frein		Kilogr. à l'heure	Travail par gramme de zinc	
Moteur	kil.	kg.			kil.	kil.
à 1 bobine.	3,300	3,75	avec 6 élem.	13,500	93,75	112,75
à 2 bobines	5	8	avec 12 élem.	28,800	100	120
à 4 bobines	10	20	avec 24 élem.	72,000	125	150
à 8 bobines	20	56	avec 48 élem.	201,600	175	206

Note C. — **Sur le rendement électrique. — Réponse de M. Th. du Moncel à certaines critiques relatives aux expériences de M. Deprez entre Miesbach et Munich.**

La manière inexacte dont on a en général rendu compte de ma communication à l'Académie relativement aux expériences faites par M. Marcel Deprez entre Miesbach et Munich, me force de m'expliquer plus catégoriquement que je ne l'ai fait sur ce qu'on appelle le rendement électrique. Car c'est faute d'avoir compris ce terme que beaucoup de personnes ont cru qu'il y avait une contradiction fâcheuse entre le chiffre du rendement électrique tel qu'il avait été donné d'abord par M. Deprez et le chiffre du rendement mécanique obtenu plus tard par la Commission électro-technique.

Le rendement d'une machine électromotrice par rapport à une autre qui la met en mouvement est exprimé par le rapport du travail mécanique utile que développe la seconde

au travail absorbé par la première. Mais on peut estimer ce travail de deux manières différentes : soit par un procédé mécanique en appliquant un dynanomètre de transmission sur la machine génératrice et un frein de Prony ou tout autre appareil similaire sur la seconde; soit par des procédés électriques en mesurant l'intensité du courant qui traverse les deux machines ainsi que les forces électromotrices, l'une directe, l'autre inverse, développées par ces machines. Dans ce dernier cas, on peut conclure le travail mécanique absorbé par la première et celui qui est restitué par la seconde, des mesures électriques prises sur chacune d'elles, en appliquant certains théorèmes fondamentaux d'électro-dynamique que nous allons rappeler brièvement. Mais avant d'aller plus loin, il est nécessaire de faire remarquer que le rendement calculé d'après cette seconde méthode est nécessairement plus élevé que celui que l'on obtient par la mesure mécanique directe, car il n'est autre chose que l'expression de ce que serait le rendement mécanique si les machines étaient parfaites, c'est-à-dire exemptes de frottements, de trépidations, et même de certaines imperfections de nature électrique qui ne pourraient être éliminées complètement que si l'anneau était composé d'un nombre infini de sections infiniment petites. Ces dernières causes de perte sont ordinairement très petites et ne dépassent pas 3 à 4 pour 100.

La loi de Joule nous permet de calculer facilement le travail mécanique développé sous forme de chaleur dans un circuit inerte, c'est-à-dire dans lequel il n'y a ni actions mécaniques ni actions chimiques. Cette quantité de travail a pour expression l'une de ces trois formes :

$$RI^2, \frac{E^2}{R} \quad \text{ou} \quad EI.$$

La première forme convient au cas où l'on connaît la résistance R du circuit et l'intensité I du courant, la seconde lorsqu'on donne la force électromotrice E de la source et la résistance R, et enfin la dernière lorsqu'on ne connaît que la force électromotrice E et l'intensité I. Les deux dernières expressions se déduisent immédiatement de la première (qui a été obtenue expérimentalement par Joule) en la combinant avec la loi d'Ohm.

Il est essentiel de remarquer que les nombres fournis par ces expressious représentent des *kilogrammètres par seconde*, à la condition que E, I et R soient respectivement exprimés en volts, en ampères et en ohms, et que chacune d'elles soit divisée par le nombre $g=9^m,81$, qui représente l'accélération due à la pesanteur. L'introduction de ce coefficient tient à la nature même des unités électriques (volt, ampère, ohm) préconisées par l'Association britannique et adoptées par le Congrès des électriciens en 1881. Si l'on voulait connaître le nombre de calories développées pendant une seconde par le passage du courant dans le circuit, il faudrait diviser le nombre de kilogrammètres trouvé par l'équivalent mécanique de la chaleur, c'est-à-dire par 425. Ainsi, la quantité de travail mécanique (exprimé en kilogrammètres par seconde) qui est mise en liberté dans un circuit inerte, sous forme de chaleur, par le passage d'un courant électrique, est représentée indifféremment par l'une des trois expressions :

$$\frac{RI^2}{g}, \quad \frac{E^2}{gR}, \quad \frac{EI}{g}.$$

Considérons maintenant le cas où le circuit, au lieu d'être inerte, comme nous l'avons supposé, contient un moteur électrique parfait (c'est-à-dire basé sur le principe qui a été pour la première fois appliqué par le professeur Pacinotti), exempt de frottements et de trépidations, et dont l'axe soit chargé d'un frein permettant de mesurer la totalité du travail développé quand le moteur tourne. La quantité d'énergie totale développée par la source d'électricité apparaît alors dans l'ensemble du circuit sous deux formes différentes : de la chaleur et du travail. Or, l'intensité du courant étant la même en tous les points du circuit, quelle que soit la nature des phénomènes qui s'y accomplissent (loi de Ohm vérifiée par Faraday), et la résistance d'un circuit métallique étant, quand les appareils sont convenablement établis, indépendante de son état de repos ou de mouvement, ainsi que des forces électromotrices dont il pourrait être le siège[1]; la quan-

1. Quelques personnes ont cru que certains effets observés dans les pièces mobiles des machines en mouvement avaient pour cause un accroissement réel de la résistance de la machine; mais une étude plus approfondie a montré que cette cause résidait dans des

tité de chaleur développée dans tout le circuit est toujours exprimée par $\frac{RI^2}{g}$.

D'autre part, la quantité totale de travail ou d'énergie engendrée par la source et dépensée dans l'ensemble du circuit, soit sous forme de chaleur, soit sous forme de travail, est dans tous les cas représentée en kilogrammètres par seconde par $\frac{EI}{g}$. De nombreuses démonstrations ont été données de ce théorème fondamental, et nous ne croyons pas nécessaire de les répéter ici, mais nous allons faire voir comment on peut le déduire immédiatement du principe de la conservation d'énergie et de la loi de Faraday. Considérons une pile de n éléments ayant chacun une force électromotrice prise pour unité et produisant un courant d'intensité I. D'après la loi de Faraday, la quantité de zinc dissoute *dans chaque élément* pendant l'unité de temps est proportionnelle à I, et la quantite *totale* de zinc dissoute dans les n éléments sera par conséquent proportionnelle à nI, c'est-à-dire à EI. Or, à cette quantité de zinc dissoute correspond un nombre de calories, c'est-à-dire une quantité d'énergie parfaitement déterminée. On a donc le droit de dire que la quantité totale d'énergie produite par une source d'électricité pendant l'unité de temps est proportionnelle au produit EI, et elle est en réalité mesurée par $\frac{EI}{g}$, comme nous l'avons dit plus haut, lorsqu'on adopte les unités de l'Association britannique.

Désignons maintenant par T le travail mécanique produit par le moteur, exprimé en kilogrammètres par seconde : l'énergie totale développée par la source égale à la somme des énergies partielles (quelles que soient leurs formes) développées dans tout le circuit, nous aurons l'équation

$$\frac{EI}{g} = \frac{RI^2}{g} + T ;$$

d'où nous tirons : $$T = \frac{I(E - RI)}{g}.$$

effets secondaires, des forces électromotrices d'extra-courants n'ayant aucun rapport avec la résidence du circuit et dont il est tenu compte dans la détermination des forces électromotrices des machines qui est fournie par l'expérience directe.

Pour interpréter le second membre de cette égalité, cherchons à ramener le terme E — RI à une forme plus simple, et pour cela remarquons que dans l'équation fondamentale qui représente la loi d'Ohm : $I = \frac{E}{R}$, il est expressément entendu que E représente la somme algébrique des forces électromotrices positives et des forces électromotrices négatives (s'il y en a) qui se trouvent dans le circuit, de sorte que si nous représentons les premières par E et les secondes par e, l'équation devient :

$$I = \frac{E - e}{R}, \quad \text{d'où} \quad e = E - RI.$$

D'après cela l'expression E — RI représente toujours une force électromotrice négative, et on peut en conclure que lorsqu'un moteur électrique produit du travail, il engendre nécessairement une force électromotrice de sens contraire à celle de la source ; c'est en effet ce que l'expérience confirme complètement.

En écrivant sous cette forme le terme E — RI, l'équation du travail devient :

$$T = \frac{eI}{g}, \quad \text{ou en rappelant que} \quad I = \frac{E - e}{R}$$

$$T = \frac{e(E - e)}{gR}.$$

De même, la quantité totale d'énergie développée par la source deviendra

$$T_1 = \frac{EI}{g} = \frac{E(E - e)}{gR},$$

et le travail perdu sous forme de chaleur $\frac{RI^2}{g}$ ou $\frac{R}{g}\left(\frac{E - e}{R}\right)^2$

c'est-à-dire $\frac{(E - e)^2}{gR}$.

Nous résumerons ces résultats en écrivant :

Quantité d'énergie exprimée en kilogrammètres par seconde.		
	Dépensé par la source..	$\frac{EI}{g} = \frac{E(E-e)}{gR}$
	Récupérée sous forme de travail utilisable par le moteur..............	$\frac{eI}{g} = \frac{e(E-e)}{gR}$
	Perdue dans tout le circuit sous forme de chaleur.	$\frac{RI^2}{g} = \frac{(E-e)^2}{gR}$

Ces expressions constituent ce qu'on pourrait appeler les équations fondamentales de la théorie du transport de la force.

Elles ne sont d'ailleurs applicables, en toute rigueur, qu'à des moteurs électriques parfaits, c'est-à-dire à ceux dont la force électromotrice n'éprouve aucune variation pendant la durée d'un tour.

Cet idéal est réalisé par les appareils qui servent à démontrer la rotation d'un circuit mobile par un aimant servant d'axe à ce circuit. Les moteurs fondés sur le principe de Pacinotti s'en rapprochent d'autant plus que le nombre des sections de l'anneau est plus grand; mais, ainsi que nous le disions plus haut, ils peuvent être considérés comme étant, dès à présent, si voisins de la perfection absolue, qu'il n'y a guère d'espoir de les améliorer à ce point de vue. Les expériences dynamométriques dont ces appareils ont été l'objet dans ces dernières années ont prouvé en effet que l'expression $\frac{EI}{g}$ représente environ les 0,95 du travail mécanique appliqué à la poulie, déduction faite du travail employé à vaincre les frottements; c'est-à-dire que si le travail total appliqué à la poulie est représenté par 100, et que le travail absorbé par les frottements puisse être représenté par 10, le produit $\frac{EI}{g}$ peut atteindre les $\frac{95}{100}$ du travail restant (100 — 10) absorbé par des actions purement électriques, soit 85,5. La différence 90 — 85,5 représente donc les pertes dues aux imperfections de nature électrique qui existeraient même dans un moteur exempt de tout frottement, et qui atteignent, comme nous le disions au commencement de cet article, 4 à 5 pour cent.

Les équations fondamentales nous permettent de calculer immédiatement la valeur du rendement économique, c'est-à-dire la valeur du rapport du travail mécanique restitué par le moteur au travail absorbé par la machine génératrice. Il suffit pour cela de diviser la première expression par la seconde. Nous avons donc en désignant par k ce rendement économique :

$$k = \frac{eI}{g} : \frac{EI}{g} = \frac{e}{E}.$$

Or cette expression ***est indépendante de la résistance***, et on peut en conclure que le rendement économique ne dépend que du rapport de la force électromotrice inverse du moteur à la force électromotrice du générateur. C'est ce que M. Marcel Deprez a exprimé en termes abrégés en disant : ***Le rendement est indépendant de la distance***. Mais si le rendement économique est indépendant de la résistance, il n'en est pas de même du ***travail absolu***[1] auquel plusieurs personnes mêlées aux polémiques soulevées dernièrement par les expériences de M. Deprez ont affecté de donner le nom de ***rendement***, ignorant sans doute que ce terme a toujours eu en mécanique une signification parfaitement définie, longtemps avant qu'il fût question de moteurs électriques.

Afin de pouvoir étudier facilement l'influence de la résistance du circuit sur le travail absolu, nous allons introduire dans les équations ci-dessus la valeur du rendement économique k que l'on veut obtenir.

De l'équation

$$k = \frac{e}{E},$$

on tire :

$$e = kE,$$

et en remplaçant e par cette valeur dans les équations précédentes elles deviennent ;

Travail absorbé par la machine génératrice. ...... $\left\{ \frac{E^2 (1-k)}{gR} \right.$

— rendu par la machine réceptrice.. ...... $\left\{ \frac{E^2 k(1-k)}{gR} \right.$

— perdu sous forme de chaleur... ... . $\left\{ \frac{E^2 (1-k)^2}{gR} \right.$

Mais, sous cette forme, les équations se prêtent facilement à la discussion. La seconde montre immédiatement que lorsqu'on suppose donnée la force électromotrice E de la machine génératrice, le travail rendu par la réceptrice peut être obtenu eu assignant au rendement économique deux

1. Pour maintenir constant le travail transporté, quelle que soit la résistance, il faut, comme l'a énoncé le premier M. Marcel Deprez, faire croître la force électomotrice de la source proportionnellement à la racine carrée de la résistance.

valeurs différentes complémentaires l'une de l'autre, telles que $\frac{2}{10}$ et $\frac{8}{10}$ ou $\frac{3}{10}$ et $\frac{7}{10}$ ou $\frac{4}{10}$ et $\frac{6}{10}$.

Ainsi le travail absolu de la réceptrice peut être le même dans deux expériences différentes, tandis que le rendement économique a des valeurs extrêmement dissemblables.

Nous verrons que ces différences tiennent à la charge du du frein appliqué sur la machine. Suivant que la charge du frein est faible ou forte, la vitesse du récepteur est grande ou petite, mais le travail par seconde, c'est-à-dire le produit de l'effort résistant du frein par la vitesse du point d'application de cet effort, peut rester le même. Ce travail est d'ailleurs nul dans deux cas : lorsque $k = 0$ et lorsque $k = 1$.

La première de ces valeurs correspond au cas où le frein est suffisamment chargé pour empêcher complètement le récepteur de tourner, et la seconde au cas où il est au contraire complètement déchargé. Il y a donc une valeur du rendement économique pour laquelle le travail utile du récepteur est le plus grand possible. La somme des deux facteurs k et $1 - k$ étant constante, ce maximum est atteint lorsque ces facteurs sont égaux, c'est-à-dire lorsque $k = \frac{1}{2}$. C'est ce qu'indique, du reste, la *dérivée* $\frac{E^2}{gR}(1 - 2k)$ du second membre de la seconde équation.

Le travail utile rendu devient alors égal à :

$$\frac{E^2}{4gR},$$

tandis que le travail dépensé par la machine génératrice est égal à :

$$\frac{E^2}{2gR}.$$

Si l'on empêchait complètement le récepteur de tourner, on aurait $k = 0$, et le travail dépensé par la source deviendrait le plus grand possible et égal à $\frac{E^2}{gR}$, valeur identique à celle que donnerait l'application de la loi de Joule à un circuit inerte. On voit que le travail mécanique maximum développé par le récepteur correspond au rendement économique égal à $\frac{1}{2}$ et que lorsqu'on fait varier le rendement économique de-

puis 1 jusqu'à zéro, le travail dépensé par le génerateur va constamment en croissant depuis zéro jusqu'à $\frac{E^2}{gR}$, quoique la force électromotrice reste constante.

Ces considérations, quoique fort simples, ne laissent pas que de paraître un peu délicates et complexes au premier abord, et c'est faute de les bien connaître que nombre de personnes ont écrit, dans ces derniers temps, une foule de choses inexactes sur le transport de la force. Pour n'en citer qu'un exemple, une des erreurs les plus répandues consiste dans cette croyance que le rendement économique ne peut jamais dépasser 50 pour cent, parce qu'il atteint cette valeur lorsque le travail développé par le récepteur est le plus grand possible en valeur absolue.

Toutes les circonstances du fonctionnement du générateur et du récepteur deviennent d'une clarté saisissante lorsqu'on prend pour point de départ la charge du frein du récepteur, ainsi que l'a fait M. Marcel Deprez dans ses dernières études théoriques sur le transport de la force. Il a démontré, en effet, que ce seul élément suffit pour déterminer complètement la vitesse et par suite le travail absolu du récepteur, sa force électromotrice inverse, le rendement économique et l'intensité du courant, pourvu que l'on connaisse certains éléments intimement liés à la construction des machines et la résistance de la ligne.

Il est ainsi arrivé à établir des formules remarquables par leur simplicité et par le petit nombre d'éléments variables qu'elles contiennent, et dans lesquelles ne figurent plus les symboles électriques qui sont remplacés par un élément nouveau, auquel M. Deprez a donné le nom de *Prix de l'effort statique*. Celui-ci ne dépend absolument que du mode de construction de la machine et nullement de sa résistance intérieure. Nous renverrons les lecteurs qui désireraient connaître ce travail au numéro du 4 novembre de la *Lumière électrique*, mais nous croyons utile de décrire l'expérience fondamentale sur laquelle est basée cette nouvelle théorie, expérience que M. Deprez a répétée devant nous, il y a quelques jours[1].

1. M. Deprez a d'ailleurs fait connaître cette expérience il y a

On monte sur l'axe d'un récepteur électrique quelconque, Gramme ou Hefner-Alteneck, un frein dynamométrique à réglage automatique, c'est-à-dire maintenant rigoureusement constant l'effort tangentiel appliqué à la poulie du frein, quelles que puissent être les variations du frottement. Puis on lance dans ce récepteur un courant emprunté à une machine génératrice, après avoir eu soin d'intercaler dans le circuit un galvanomètre d'intensité ou ampèremètre. Un autre galvanomètre (qui doit être très résistant) est placé en dérivation sur les bornes de la machine génératrice pour faire connaître la différence de potentiel qui existe entre les bornes de cette machine. Ces dispositions étant prises, on fait tourner la machine génératrice à une vitesse graduellement croissante, et l'on constate que tant que la machine réceptrice n'est pas entrée en mouvement, les deux galvanomètres suivent une marche parallèle indiquant que la force électromotrice du générateur et l'intensité du courant engendré croissent proportionnellement. Mais à partir du moment où le récepteur commence à tourner, l'aiguille du galvanomètre d'intensité reste fixée invariablement sur la même division, quelle que soit la vitesse de la génératrice, tandis que l'aiguille du galvanomètre placé en dérivation sur les bornes de la génératrice indique que la force électromotrice augmente de plus en plus avec la vitesse de la génératrice. Il en est de même de la vitesse de la réceptrice qui, dans l'expérience dont nous avons été témoin, a varié depuis zéro jusqu'à 32 tours par seconde sans que l'intensité du courant ait varié de plus de $\frac{1}{30}$ de sa propre valeur.

On peut faire l'expérience d'une autre façon en ajoutant ou en retranchant des résistances auxiliaires placées dans le circuit, et le résultat obtenu est le même : l'intensité du courant est constante. Ainsi, quoi qu'on fasse, dès que la machine réceptrice est en mouvement, il est impossible de faire varier l'intensité du courant tant qu'on ne change pas la charge du frein. Un accroissement quelconque de la force électromotrice

près de deux ans,en la donnant comme une loi à l'abri de toute contestation. (Voir le numéro du 10 août 1881 de la *Lumière électrique*.)

du générateur ou, ce qui revient au même, une diminution quelconque dans la résistance du circuit a pour unique effet d'augmenter la vitesse du récepteur. Mais, au contraire, si l'on change la charge du frein, l'intensité du courant nécessaire pour maintenir la réceptrice en mouvement sous cette charge change aussi, tout en restant indépendante de la vitesse de la réceptrice. La conclusion nécessaire de cette importante expérience, c'est que, comme le dit M. Deprez : *L'intensité de l'effort développé entre les pièces fixes et les pièces mobiles d'une machine dynamo-électrique, lorsqu'elle est traversée par un courant, est indépendante de la grandeur et de la direction de la vitesse de l'anneau et ne dépend que de l'intensité du courant.* Ce principe avait du reste été entrevu il y a trois ans par M. Pollard.

M. Marcel Deprez a pu, en s'appuyant sur cette seule loi, reconstruire entièrement la théorie du transport de la force et la rendre d'une simplicité telle que nous ne croyons pas superflu de donner ici l'exemple de son application à un cas particulier, quoiqu'elle ait été déjà publiée.

Plaçons deux machines dynamo-électriques identiques, l'une génératrice, l'autre réceptrice, aux extrémités d'un circuit de résistance quelconque; adaptons à la réceptrice un frein dynamométrique chargé d'un poids déterminé et imprimons à la génératrice une vitesse graduellement croissante. En vertu de la loi précitée, l'intensité du courant deviendra constante dès que la réceptrice sera entrée en mouvement, et l'effort tangentiel développé sur l'anneau de la génératrice sera égal à celui qui est appliqué à l'anneau de la réceptrice en vertu de l'indépendance de l'action mécanique du courant (qui est le même dans tous les points du circuit), par rapport à la grandeur ou à la direction de la vitesse de l'anneau. Or les deux anneaux ayant des dimensions identiques et étant soumis à des efforts tangentiels identiques, le rendement *a pour expression le rapport de leurs vitesses respectives.* Mais il a été établi d'une manière irréfutable depuis longtemps que dans une machine magnéto-électrique la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse tangentielle de l'anneau et à l'intensité du champ magnétique; or, les deux machines étant identiques et traversées par le même courant, leurs champs magnétiques sont égaux, donc les forces électromo-

trices développées respectivement par la réceptrice et par la génératrice sont entre elles comme les vitesses des anneaux de ces machines. Nous aurons par conséquent, en désignant les forces électromotrices et les vitesses correspondantes de la réceptrice et de la génératrice par e, E, v, V et par k le rendement :

$$\frac{e}{E} = \frac{v}{V} = k.$$

Nous retombons ainsi sur la valeur $\frac{e}{E}$ que nous avions déjà trouvée pour le rendement économique par une méthode toute différente.

La loi de la proportionnalité entre les vitesses et les forces électromotrices a été, il est vrai, coutestée dans ces derniers temps par quelques personnes qui avaient prétendu également que la résistance de l'anneau d'une machine dépend de sa vitesse. Mais il ne faut pas attacher d'importance à ces tentatives de réforme des lois les mieux établies. Elles se produisent périodiquement même dans les sciences où l'expérience n'a rien à voir, telles que les mathématiques, et *à fortiori* dans les sciences expérimentales. Il faut reconnaître d'ailleurs que les réformateurs en question professent pour l'expérience un dédain qui pourrait s'expliquer par la persistance avec laquelle l'expérience contredit leurs conceptions théoriques.

Revenons maintenant à l'expérience de M. Marcel Deprez.

Si l'on réfléchit qu'avant l'expérience de Munich les expériences de transport de force les plus hardies avaient été faites avec un circuit composé d'un fil de cuivre ayant un diamètre de 4 millimètres, une longueur de 6400 mètres, une résistance de 8 ohms $\frac{4}{10}$ et soigneusement recouvert d'une épaisse couche isolante sur toute sa longueur, tandis que M. Marcel Deprez a accepté de se servir d'un fil télégraphique en fer exposé à la pluie, ayant une longueur de 114 000 mètres et une résistance de 950 ohms, et que, malgré ces énormes différences dans les conditions des deux expériences, le rendement industriel a été le même (30 pour 100), on reconnaîtra facilement que l'expérience de Miesbach à Munich constitue un fait capital dans l'histoire du transport de la force. Nous n'en voulons pas d'autres preuves que l'acharnement avec

lequel les adversaires de M. Deprez ne pouvant plus élever de doutes sur la réalité de l'expérience dont ils se moquaient avant comme d'une tentative qui couvrirait son auteur de ridicule, s'efforcent maintenant de la rapetisser, d'en atténuer les conséquences, en discutant le chiffre du rendement mécanique. Entraînés par leur esprit de critique, ils vont même jusqu'à échafauder de toutes pièces des théories nouvelles du transport de la force destinées à battre en brèche les principes si simples que nous venons de rappeler brièvement; ils réforment les lois les mieux établies de l'électricité, et enfin introduisant dans leurs calculs des nombres complètement dépourvus d'authenticité, ils arrivent, triomphants, à trouver pour le rendement *théorique* un chiffre inférieur à celui qui a été réellement constaté à l'aide du frein et du dynamomètre !!!!

Lorsque M. Marcel Deprez, dans sa communication à l'Académie, a donné pour la valeur du rendement le chiffre de 60 pour 100, il a pris soin de dire que ce rendement était mesuré (les machines étant identiques) par le rapport des vitesses des deux machines (qui étaient 2000 et 1200 tours), abstraction faite des résistances passives de toute nature, et ce seul énoncé indiquait nettement que c'était là le rendement théorique $\frac{e}{E}$. Sa communication étant destinée à des physiciens, il n'avait pas à s'expliquer davantage à cet égard, parce qu'il savait bien que le public spécial auquel il s'adressait ne commettrait aucune méprise, et saurait bien faire la différence entre le rendement $\frac{e}{E}$ ou $\frac{v}{V}$ qui est une limite supérieure et le rendement industriel.

Il ne pouvait d'ailleurs donner ni les mesures électrique directes (force électromotrice, intensité du courant) parce qu'il n'avait pas les instruments nécessaires pour les effectuer, ni les mesures dynamométriques relatives à la génératrice. Il dut donc attendre que la commission-électro-technique procédât aux expériences.

Il a fait dans la *Lumière électrique* le récit détaillé des circonstances dans lesquelles ces expériences ont été faites, et nous n'y ajouterons qu'un renseignement, qui nous a été fourni depuis par M. Deprez lui-même et qu'il nous autorise à donner en faisant des réserves sur l'exactitude absolue des

chiffres, dont il n'a pu obtenir communication que d'une façon verbale par les membres de la Commission, qui n'avaient pu eux-mêmes faire le récollement de toutes les expériences.

La différence de potentiel mesurée directement aux bornes de la machine de Munich tournant à une vitesse comprise entre 720 à 760 tours par minute aurait été trouvée égale à 830 volts environ, et l'intensité du courant mesurée à Miesbach aurait été de 0,4 d'ampère[1]. Mais il résulte des expériences faites par M. le professeur Kittler[2], avec une pile de 100 éléments Meidinger (ayant une force électromotrice de 105 volts) *après 14 jours de pluie et en employant la terre comme fil de retour*, que le courant ayant à Munich une intensité de 0,0692 ampère était encore à son arrivée à Miesbach égal à 0,0674, c'est-à-dire égal aux 0,974 de son intensité primitive. On peut admettre que le courant avait pratiquement la même intensité à Miesbach et à Munich, soit 0,4 ampère; or la résistance de la machine de Munich était de 475 ohms. Ces nombres permettent de calculer immédiatement la force électromotrice et la valeur théorique du travail mécanique qu'aurait dû produire la machine de Munich. On trouve ainsi

$$e = 830 - 0,4 + 475 = 640^{\text{volts}}, \qquad \frac{eI}{g} = 25^{\text{kgm}},6.$$

Or le travail indiqué au frein était de $\frac{1,5 \times 740}{60} = 18^{\text{kgm}},5$[1]; le rendement propre à la réceptrice était donc environ de $\frac{1,85}{2,56} = 0,72$. D'autre part, la résistance de la ligne etait de 950 ohms; celle de la génératrice située à Miesbach de 470 ohms; et ces chiffres permettent de trouver facilement que la force électromotrice de la machine de Miesbach, etait de:

$$830 + 0,4 \times 1420 = 1400 \text{ volts.}$$

Le travail qu'elle aurait dû absorber théoriquement avait pour valeur $\frac{1400 \times 0,4}{9,81} = 56$ kilogrammètres par seconde, et

1. D'après les chiffres officiels transmis un mois après le travail de M. du Moncel, il paraîtrait que cette intensité aurait été 0,5 d'ampère au lieu de 0,4. Il en résulte que le rendement ci-dessous estimé à 0,45 n'a atteint d'après le rapport du comité que 0,389.

2. Ces expériences sont relatées dans une lettre adressée le 6 août 1882 par M. de Beetz à M. Marcel Deprez qui nous l'a communiquée.

en supposant que son rendement propre fût aussi de 0,72, on trouve qu'elle aurait absorbé un travail mécanique (mesuré au dynamomètre) de 80 kilogrammètres environ.

Le rendement électrique mesuré par le rapport des forces électromotrices aurait eu pour valeur $\frac{640}{1400} = 0,46$, tandis que le mesurant par le rapport des vitesses[1] (la machine de Miesbach faisant 1600 tours par minute) on trouve :

$$\frac{730}{1600} = 0,455.$$

Il n'y a pas lieu d'attacher une trop grande importance à la coïncidence remarquable de ces deux chiffres; ils auraient pu différer notablement sans cesser de confirmer les expressions du rendement électrique. Ajoutons que pendant une semaine la réceptrice a fait marcher une pompe centrifuge tournant à la vitesse de 900 tours par minute (elle avait une poulie égale à celle de la réceptrice), et alimentait une jolie cascade de près de 3 mètres de hauteur.

Après plusieurs heures de marche consécutives, les deux machines ne présentaient pas d'élévation appréciable de température, ce qui, étant donnée leur énorme résistance intérieure, démontre péremptoirement que l'intensité du courant était très petite, ainsi que la quantité d'énergie perdue sous forme de chaleur.

Nous pensons avoir montré surabondamment que le succès de l'expérience hardie, tentée par M. Marcel Deprez, a pleinement confirmé les calculs et les vues théoriques de cet ingénieur, et que l'incompatibilité que ses adversaires ont voulu établir entre la valeur du rendement électrique et celle du rendement mécanique n'existe pas. Nous exprimerons, en terminant, le regret que les expériences de la Commission n'aient pu être faites dans les conditions de la première expérience faite par M. Sarcia et dans laquelle le travail utile a atteint $\frac{1}{\ }$ cheval. Le chiffre du rendement eût été bien supé-

1. Dans l'expérience faite le 26 septembre par M. Sarcia, la vitesse de la génératrice était de 2200 tours par minute, celle de la réceptrice 1508, et le travail développé au frein atteignait 37,5. Ces nombres ont été contrôlés par un agent attaché au service technique de l'Exposition, M. Tatterer

rieur. M. Deprez a exposé avec beaucoup de détails, dans sa lettre du 11 novembre dernier, les causes pour lesquelles la Commission n'a pu opérer dans ces conditions.

TH. DU MONCEL.

NOTE D. — Sur la caractéristique des machines dynamo-électriques.

Depuis l'application fréquente que l'on a faite des machines dynamo-électriques, on a étudié avec soin les différents effets qu'elles réalisent, les caractères et les propriétés qu'elles possèdent, et M. M. Deprez a trouvé une méthode très simple de représenter par une courbe ces différents caractères, de manière à ce que l'on puisse en déduire immédiatement, et par un simple tracé graphique, les différents effets qu'une machine peut fournir. C'est cette courbe à laquelle M. Deprez a donné le nom de *Caractéristique.*

Pour l'obtenir, on lance dans le circuit inducteur séparé du circuit induit des courants d'intensité déterminée provenant d'une source étrangère, et on fait tourner ensuite l'induit avec une vitesse également déterminée. Pour chaque intensité du courant, ainsi mis en circulation dans le circuit inducteur, on mesure la force électromotrice développée sur l'induit, et on les reporte successivemeut sur une ligne verticale constituant la ligne des y ou des ordonnées de la courbe que l'on cherche, alors qu'on reporte sur la ligne perpendiculaire des x ou des abscisses, les valeurs des intensités électriques, que l'on expérimente. En menant par ces différents points des lignes verticales et horizontales, on obtient. à leurs intersections, les points par lesquels passe la *Caractéristique* de la machine expérimentée.

La forme de cette courbe dépend de la construction de la machine, de ses dimensions et des rapports de ses diverses parties; elle en représente le fonctionnement et caractérise nettement l'appareil; de là vient le nom qui lui a été donné. Elle permet même de résoudre graphiquement les questions qui peuvent se poser dans l'emploi d'un appareil

de cette nature, et conduit à l'explication de plusieurs phénomènes interessants. Ainsi, quand on l'étudie pour une machine Gramme par exemple, sur la figure 112, on voit que la force électromotrice développée augmente d'abord rapidement, ensuite de moins en moins vite, et finit par devenir stationnaire vers H, la courbe tendant à devenir parallèle à l'axe des x; cela tient à ce que l'aimantation du fer doux des électro-aimants ne croît pas indéfiniment et qu'il y a un point de saturation que l'on n'atteint pas, il est vrai, complètement, mais vers lequel on tend de plus en plus.

Comme l'intensité d'un courant est reliée à la fois à la force

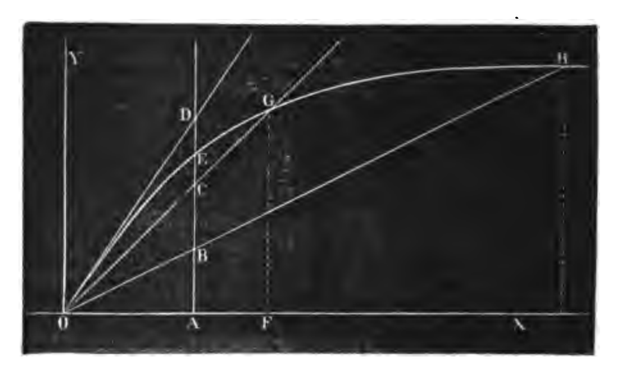


Fig. 112. — Caractéristique d'une machine dynamo-électrique.

électromotrice et à la résistance, on comprend facilement que, connaissant par la courbe précédente la force électromotrice et l'intensité du courant aux différents points de la courbe, on pourra facilement en déduire la résistance R du circuit correspondante à une intensité et à une force électromotrice données; car si leur rapport représente précisément cette résistance, comme cela résulte de la formule de Ohm $R = \frac{E}{I}$, comme le rapport $\frac{E}{I}$ représente alors celui des deux côtés d'un triangle rectangle, il devient égal à la tangente de l'angle formé par la ligne des abscisses OX avec la ligne GO, par exemple, qui joint l'origine de cette dernière, avec le point considéré G de la courbe. Si cet angle est de 45°, la tangente

devenant égale à 1, représente le rapport de l'unité de force électromotrice à l'unité d'intensité, c'est-à-dire *l'ohm* ou l'unité de résistance, et l'on peut s'en servir pour l'établissement d'une échelle de graduation des résistances.

Cela posé, examinons ce qui arrive quand on fait croître ou décroître la résistance représentée comme nous l'avons dit par la tangente de l'angle correspondant aux différents points de la courbe. On verra d'abord que pour les points placés dans la partie presque parallèle à la ligne des abscisses, en H, par exemple, la résistance du circuit est de plus en plus petite, et que, au contraire, elle devient de plus en plus grande pour les points placés du côté opposé, ce qui indique par conséquent un accroissement progressif de l'intensité électrique, sans grand résultat dans un cas, et une diminution très rapide de cette intensité dans l'autre cas; il viendra même un moment où il n'y aura plus aucun courant de transmis; ce sera quand la ligne OD limitant la tangente, sera elle-même tangente à la courbe à son origine en O. Or ceci montre que dans les machines dynamo-électriques il est une résistance déterminée pour laquelle l'excitation est nulle et cesse de fonctionner.

La caractéristique d'une machine dynamo-électrique est essentiellement liée à la vitesse V de rotation de l'induit et au nombre de tours de spires *t* de l'hélice qui l'entoure, car les forces électromotrices développées sont, ainsi que l'expérience l'a démontré, proportionelles à ces deux quantités. Conséquemment, pour obtenir la caractéristique d'une machine dont on fait varier la vitesse ou le nombre des spires de l'anneau, il suffit de multiplier les ordonnées de la courbe par les rapports $\frac{V'}{V}$ ou $\frac{t'}{t}$, ce qui donnera les forces électromotrices, et on pourra même en déduire les résistances du circuit ainsi que l'intensité du courant, au moyen d'un simple tracé géométrique, que M. Deprez indique, avec beaucoup d'autres encore se rattachant à cette question, dans son grand travail sur les caractéristiques publié dans le journal la *Lumière électrique* du 3 décembre 1881, auquel nous renvoyons le lecteur.

Dans une série d'autres articles publiés dans les tomes VI et VII de la *Lumière électrique*, M. Deprez donne même les caractéristiques des principales machines dynamo-électriques en

usage, montées de diverses manières et avec des vitesses différentes. Ce sont des documents très précieux pour ceux qui s'occupent de la question des moteurs électriques. On les trouvera tome VI, p. 364; tome VII, p. 114, 160, 219, 580, 599.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION ET NOTIONS PRÉLIMINAIRES

LOIS DES ÉLECTRO-AIMANTS

MOYENS EMPLOYÉS POUR DIMINUER LES EFFETS NUISIBLES PRODUITS DANS LES ÉLECTROMOTEURS

PREMIÈRE PARTIE

PREMIÈRE PHASE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

I. — UN COUP D'ŒIL HISTORIQUE.

II. — MOTEURS HISTORIQUES.

III. — ANCIENS ÉLECTROMOTEURS.

I. Électromoteurs fondés sur les réactions dynamiques des courants.

II. Électromoteurs fondés sur l'attraction du fer.

SECONDE PARTIE

DEUXIÈME PHASE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

I. — MACHINES RÉVERSIBLES.

II. — GÉNÉRALITÉS SUR LES NOUVEAUX MOTEURS.

III. — LES NOUVEAUX PETITS MOTEURS.

IV. — APPLICATIONS DES PETITS MOTEURS.

V. — PREMIÈRES APPLICATIONS DU TRANSPORT DE LA FORCE.



VI. — PREMIÈRES APPLICATIONS A LA TRACTION DES VOITURES.

VII. — TRANSPORT DE LA FORCE A L'EXPOSITION D'ÉLECTRICITÉ DE 1881.

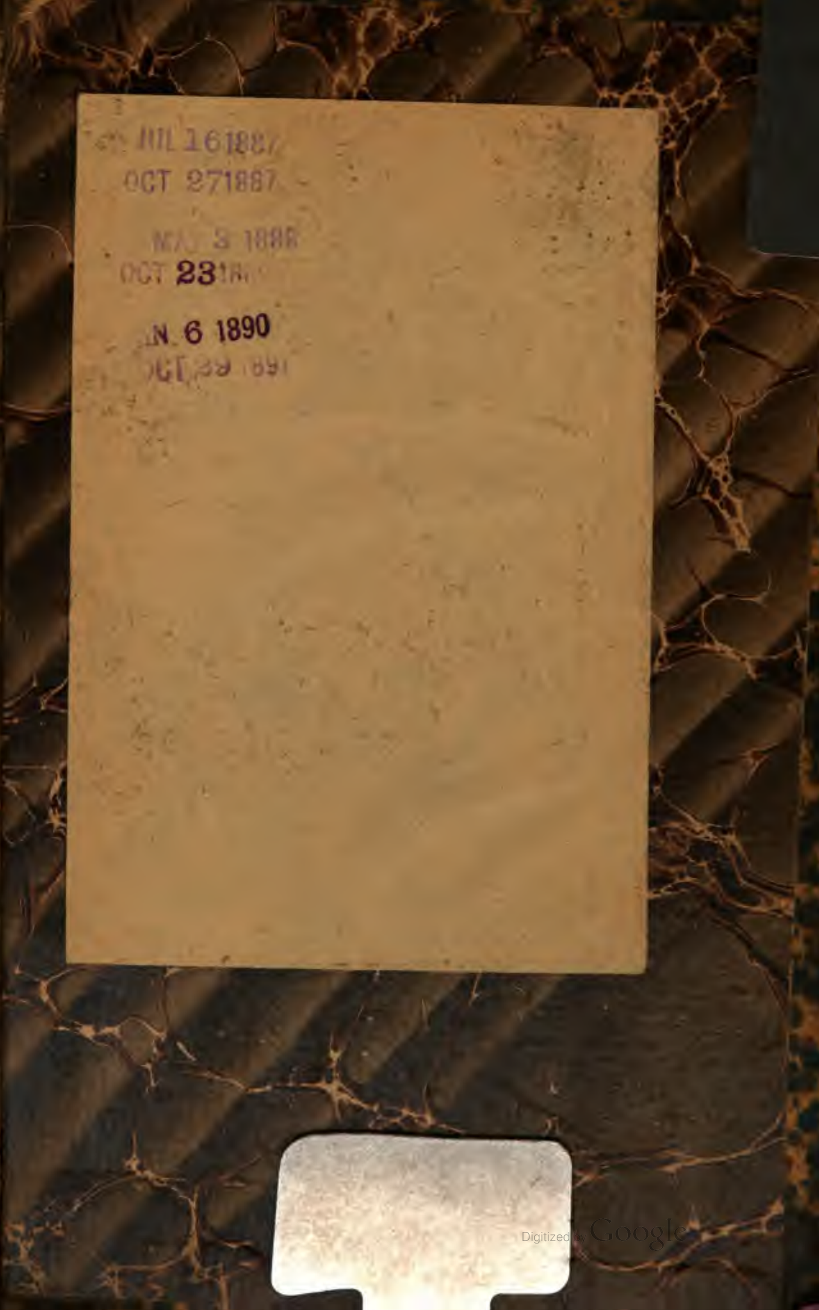
VIII. — APPLICATIONS ET EXPÉRIENCES RÉCENTES.

IX. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

NOTES

7589. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.






Eng 4098.83.3
L'electricite comme force motrice
Cabot Science 004181514
3 2044 091 977 421
Digitized by Google